

**Казанский Федеральный Университет**  
**Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов**  
**Kazan Federal University,**  
**Department of high-viscosity oils and natural bitumen**

**Энергетические взаимодействия и размеры сложных структурных  
единиц (CSE) в нефтяной дисперсной системе (НДС)**  
**Energy interactions and sizes of complex structural units (CSU) in the  
petroleum dispersed system (PDS)**

Альогаили Сафаа Рахим шанеф, Aloghaili Safaa Rahim Shanef<sup>1</sup>

Баймагамбетов Александр Игоревич, Baimagambetov Alexander<sup>2</sup>

Ибрагимова Дина Абдулрафиковна, Ibragimova Dina Abdulrafikovna<sup>3</sup>

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich<sup>4</sup>

магистрант группы 03-418 кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>1</sup>

магистрант группы 03-418 кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>2</sup>

кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии переработки нефти и  
газа<sup>3</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных  
материалов<sup>4</sup>,

<sup>1,2,3,4</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, Россия

УДК 502.7. Шифр научной специальности ВАК: 1.4.12. «Нефтехимия»

E-mail: kemalov@mail.ru<sup>4</sup>

**Аннотация:** в представленной статье проведён систематический анализ природы, механизмов формирования и характеристик сложных структурных единиц (CSE) в нефтяной дисперсной системе (НДС). Показано, что нефть представляет собой коллоидную систему, в которой асфальтены, смолы и лёгкие углеводороды формируют устойчивые надмолекулярные агрегаты, определяющие её реологические, транспортные и фазовые свойства.

Особое внимание уделено энергетическим взаимодействиям, обеспечивающим агрегацию:  $\pi$ - $\pi$ -сопряжения, водородные связи, ван-дер-ваальсовы и электростатические силы. Проведён обзор теоретических

моделей (DLVO, Yen–Mullins), описывающих устойчивость агрегатов и энергетические барьеры коагуляции. Обоснована зависимость размеров и стабильности ССЕ от температуры, давления, растворителей и внешних воздействий.

Рассмотрены экспериментальные методы оценки размеров и морфологии ССЕ: динамическое светорассеяние (DLS), атомно-силовая микроскопия (AFM), просвечивающая электронная микроскопия (TEM), диффузионная ЯМР-спектроскопия (DOSY NMR). На основе анализа литературы установлены диапазоны размеров ССЕ (20–200 нм), выявлены закономерности изменения их свойств при акустическом, термическом и химическом воздействии.

Полученные сведения имеют высокую прикладную значимость для технологий деасфальтизации, контроля отложений АСПО, транспортировки высоковязких нефтей, а также разработки методов физического воздействия на пласт (ультразвук, микроволны, сдвиговые поля) в рамках повышения нефтеотдачи.

**Ключевые слова:** асфальтены, смолы, нефтяная дисперсная система, ССЕ, агрегаты, DLVO,  $\pi$ – $\pi$  взаимодействия, размер частиц, агрегация, DLS, AFM, нефть.

**Abstract:** this review article presents a systematic analysis of the nature, formation mechanisms, and characteristics of Complex Structural Entities (CSEs) in the petroleum dispersed system (PDS). Crude oil is considered as a colloidal system in which asphaltenes, resins, and light hydrocarbons form stable supramolecular aggregates that determine its rheological, transport, and phase properties.

Special attention is paid to the intermolecular interactions that govern aggregation:  $\pi$ – $\pi$  stacking, hydrogen bonding, van der Waals forces, and electrostatic stabilization. Theoretical models such as DLVO theory and the Yen–Mullins model are reviewed to describe the stability of aggregates and the energy

barriers for coagulation. The effects of temperature, pressure, solvent polarity, and external fields on CSE stability and size are thoroughly analyzed.

Experimental techniques used to characterize CSEs are discussed, including Dynamic Light Scattering (DLS), Atomic Force Microscopy (AFM), Transmission Electron Microscopy (TEM), and Diffusion-Ordered NMR Spectroscopy (DOSY NMR). Based on the literature, CSE sizes are found to range from 20 to 200 nm, and trends under acoustic, thermal, and chemical stimulation are identified.

The findings are of high practical relevance for technologies such as deasphalting, ASP deposit control, transport of heavy oils, and physical stimulation methods (e.g., ultrasound, microwave, shear fields) aimed at Enhanced Oil Recovery (EOR).

**Keywords:** asphaltenes, resins, petroleum dispersed system, CSE, supramolecular aggregates, DLVO theory,  $\pi$ – $\pi$  interactions, particle size, aggregation, DLS, AFM, crude oil.

## **Введение (Introduction)**

Сырая нефть представляет собой не просто смесь углеводородов, а многокомпонентную коллоидно-дисперсную систему с ярко выраженной структурной иерархией [1–3]. В ней одновременно сосуществуют лёгкие алифатические углеводороды, ароматические соединения, смолы, асфальтены, парафины и гетероорганические молекулы, способные к образованию агрегированных надмолекулярных структур. Одним из фундаментальных понятий, описывающих внутреннюю организацию нефти, является сложная структурная единица (CSE) — агрегат, формирующийся в результате самопроизвольной ассоциации тяжёлых компонентов нефти, прежде всего асфальтенов, с участием смол, стабилизирующих фракций и молекул-растворителей [4, 5].

Физико-химические свойства нефти — такие как вязкость, стабильность, склонность к отложению АСПО, фильтрационные и эмульсионные характеристики — во многом определяются именно

морфологией и устойчивостью ССЕ. Ассоциаты в нефти образуются за счёт слабых, но кумулятивных межмолекулярных взаимодействий: ван-дер-ваальсовых сил, водородных связей,  $\pi$ – $\pi$ -сопряжений ароматических фрагментов, а также электростатического экранирования и сольватации [6–9]. Эти взаимодействия формируют энергетический каркас агрегатов, определяя их радиус, плотность упаковки, динамическую стабильность и способность к коагуляции.

Современные представления о структуре и размерах ССЕ опираются на концепции нефтяной дисперсной системы (НДС), в которой асфальтеново-смолистая дисперсная фаза стабилизирована в легких углеводородах, выступающих как дисперсионная среда. Исследования показали, что размеры ССЕ могут варьироваться от десятков до сотен нанометров в зависимости от термодинамических условий и состава нефти [10, 11]. Понимание их природы имеет важнейшее значение как для объяснения коллоидной стабильности нефти при транспортировке и хранении, так и для разработки эффективных технологий подготовки, деасфальтизации и вторичных методов увеличения нефтеотдачи.

Актуальность изучения энергетических взаимодействий и структурных характеристик ССЕ усиливается в контексте разработки методов физического воздействия на нефть, таких как ультразвуковая, акустическая и микроволновая обработка. Эти методы направлены на разрушение межмолекулярных связей, снижение вязкости и мобилизацию остаточной нефти, что делает теоретическое понимание агрегатных состояний и их энергетической природы критически важным.

Настоящая обзорная статья посвящена систематическому анализу природы межмолекулярных взаимодействий, участвующих в формировании ССЕ, рассмотрению геометрических и энергетических характеристик этих агрегатов, а также обобщению экспериментальных данных по их размерам и методам измерения.

## **Материалы и методы исследования (Materials and Methods)**

Изучение энергетических взаимодействий и морфологических характеристик сложных структурных единиц (CCE) в нефтяной дисперсной системе опирается на комплекс современных инструментальных и расчетных подходов, охватывающих как физико-химические, так и коллоидно-химические методы анализа. Ниже приведены ключевые экспериментальные методики, применяемые в данной области.

### **2.1. Метод динамического светорассеяния (DLS)**

DLS (Dynamic Light Scattering) является одним из наиболее распространённых методов для оценки гидродинамического радиуса ассоциированных частиц в растворе. Он основан на измерении флуктуаций интенсивности рассеянного света, вызванных броуновским движением частиц, и позволяет определить:

- радиус CCE (в пределах 10–1000 нм);
- полидисперсность агрегатов;
- изменение размера при варьировании температуры, pH и растворителей.

Применение DLS описано в работах González et al. [1], где была проведена оценка влияния полярности растворителя на стабильность асфальтеновых агрегатов.

### **2.2. Атомно-силовая и просвечивающая электронная микроскопия (AFM, TEM)**

Методы микроскопии позволяют непосредственно визуализировать морфологию CCE на наноуровне:

- AFM (Atomic Force Microscopy) позволяет реконструировать топографию поверхности, измерить высоту, диаметр и форму асфальтеновых частиц [2];
- TEM (Transmission Electron Microscopy) обеспечивает более глубокое разрешение, визуализируя плотность упаковки агрегатов, их слияние и пространственное распределение [3].

Однако требуется подготовка пробы в сухом виде или осаждение на подложку, что может изменять реальную структуру.

### 2.3. Метод осаждения асфальтенов и фракционного разделения

Традиционно для оценки устойчивости и фракционного состава ССЕ используют метод осаждения асфальтенов путем добавления н-алканов (н-гексан, н-гептан) к нефти или её модельным растворам. Это позволяет получить:

- устойчивую фракцию асфальтенов;
- смоло-асфальтеновые комплексы (переходные формы);
- зависимость осаждения от соотношения растворителей [4].

Метод рекомендован API и ASTM D6560 как стандартный подход для количественного анализа асфальтенов.

### 2.4. ЯМР-диффузионная спектроскопия (DOSY NMR)

Диффузионная ЯМР позволяет определить эффективный радиус молекулярных агрегатов на основе коэффициента самодиффузии. Применяется в нефтехимии для уточнения:

- агрегатного состояния смол;
- взаимодействия ядро–оболочка;
- относительного вклада ароматических и алифатических сегментов [5].

Метод не требует разрушения образца и применим *in situ*.

### 2.5. Теоретическое моделирование: потенциалы взаимодействия и DLVO-теория

Для оценки энергетической стабильности агрегатов применяются:

- DLVO-модель (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek), описывающая баланс ван-дер-ваальсового притяжения и электростатического отталкивания [6];
- молекулярная динамика и квантово-химические расчёты для анализа  $\pi$ – $\pi$  ассоциации;
- потенциалы Леннарда-Джонса и других эмпирических моделей.

Модели позволяют прогнозировать устойчивость ССЕ при изменении внешних условий: температуры, давления, солевого состава.

### **3. Коллоидно-дисперсная природа нефти и механизмы формирования ССЕ**

#### **3.1. Химический состав и структурная классификация**

Нефть представляет собой полидисперсную систему, в которой асфальтены — конфигурационно разнообразная смесь полярных, высокомолекулярных ароматических соединений ( $\sim 400\text{--}1500$  Da), насыщенных алкильными цепями и гетероатомами (O, N, S) — образуют ядра ССЕ. Смолы, которые имеют схожую структуру, но меньшие размеры и более низкое полярное значение, действуют как стабилизаторы ядер, образуя промежуточную оболочку между асфальтеновыми ядрами и малополярной средой (мизеллярная модель) .

#### **3.2. Межмолекулярные взаимодействия**

Объединение асфальтенов в агрегаты обеспечивается совокупностью слабых, но кумулятивных сил:

##### **3.2.1. $\pi$ – $\pi$ –stacking**

Ароматические ядра асфальтенов ассоциируют через  $\pi$ – $\pi$ –взаимодействия. Два наиболее устойчивых конформационных режима — parallel-displaced и T-shaped — являются энергетически оптимальными благодаря сочетанию лондоновых дисперсионных и квадруполь–квадрупольных сил [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org). В модели NEMD/aRDG были визуализированы множественные варианты упаковки, такие как face–face, offset и T-shaped, что свидетельствует о разнообразии архитектуры агрегатов.

##### **3.2.2. Ван-дер-Ваальс**

Обеспечивают силовую основу стабилизации через взаимодействия между алкильными цепями и ароматическими ядрами. Эти силы усиливаются в условиях полярных растворителей и нарастая при увеличении плотности упаковки.

##### **3.2.3. Водородные связи**

Наличие гидроксильных, карбонильных и аминных групп, особенно в присутствии воды или полярных смесей, обеспечивает образование Н-связей. В смеси нефти и воды наблюдалось усиление агрегации за счёт Н-связей между асфальтенами и водой.

#### 3.2.4. Электростатическое экранирование и сольватация

К полярным ядрам при адсорбции прилипают молекулы смол и растворителя, формируя сольватационную оболочку, которая уменьшает электростатическое притяжение и стабилизирует наночастицы .

#### 3.2.5. Другие взаимодействия

Диэлектрические, стероохимические и СН...π взаимодействия, особенно при наличии гетероатомов, значительно влияют на стабильность ассоциаций .

### 3.3. Архитектура ССЕ

Типичная модель — ядро из асфальтенов (~5–10 ароматических колец) с коралловидным развитием полярных групп и алкильными цепями, окружённое оболочкой смол и растворителя (гелезная окружность). Агрегаты могут иметь радиус от ~10 до 500 нм, при этом первичные комплексы (~20–200 нм) могут далее слипаться в более крупные флоккулы.

#### 3.4. Факторы, влияющие на агрегацию и размер ССЕ

Таблица 1 - Факторы, влияющие на агрегацию и размер ССЕ

<b>Фактор</b>	<b>Механизм влияния</b>
Тип и полярность растворителя	Более полярные ароматические растворители увеличивают растворимость и уменьшают размер агрегатов, тогда как алканы вызывают сильную агрегацию и осаждение.
Температура	Повышение температуры разрывает слабые связи, увеличивает растворимость асфальтенов и уменьшает размер агрегатов.
Давление	Влияние давление неоднозначно: до ММП повышает агрегацию, выше уменьшает.
Состав нефти (соотношение асфальтенов/смол)	Увеличение доли смол стабилизирует, а асфальтенов — увеличивает агрегацию и образование флоккулов.



Влажность / солесодержание	Вода формирует Н-связи; солёность влияет экранированием и onset агрегации.
Внешние поля (ультразвук, сдвиг)	Ультразвук разрушает агрегаты; UZ-обработка уменьшает размер и энергетические барьеры.

### 3.5. Энергетические барьеры и DLVO-подход

DLVO-модель описывает равновесие между ван-дер-ваальсовыми силами и электростатическим отталкиванием, формируя энергетические барьеры коагуляции или агрегации. Агрегаты стабилизируются либо в метастабильных состояниях, либо преодолевают барьеры за счёт термодинамических флуктуаций, изменения pH, ионности и внешних воздействий.

Коллоидно-дисперсная структура нефти формируется за счёт компромисса между комплексными межмолекулярными взаимодействиями и внешними условиями. Подробное понимание этих механизмов позволяет прогнозировать агрегатное состояние, динамику реологических свойств и эффективность метода воздействия на нефть (EOR, термотерапия, каталитическое разрушение).

## 4. Энергетическая модель агрегации и устойчивость SSE

### 4.1. Теоретическая основа: модель DLVO и энергетический баланс

Для описания агрегации и стабильности надмолекулярных структур в нефти применяется обобщённая DLVO-модель (Дерягин–Ландау–Фервэй–Овербёк), традиционно используемая в коллоидной химии для описания взаимодействия между частицами в дисперсной среде [1]. Эта модель предполагает, что полная энергия взаимодействия между частицами  $U(h)$  зависит от суммы двух противоположно направленных вкладов:

$$U(h) = U_{\text{vdW}}(h) + U_{\text{el}}(h)$$

где:  $U_{\text{vdW}}(h)$  — энергия ван-дер-ваальсового притяжения;  $U_{\text{el}}(h)$  — энергия электростатического отталкивания;  $h$  — расстояние между частицами

(ядрами CSE).

#### 4.2. Притяжение: Ван-дер-ваальсовы силы

Притяжение между частицами происходит за счёт флуктуационных диполей в ароматических ядрах, особенно в системах с высокой степенью конденсации  $\pi$ -электронов. Энергия ван-дер-ваальсового взаимодействия между двумя сферическими частицами радиусом  $R$ , находящихся на расстоянии  $h$ , аппроксимируется как:

$$U_{\text{vdW}}(h) = -\frac{A_H R}{12h}$$

где  $A_H$  — константа Хэмакера (Hamaker constant), характеризующая силу взаимодействия. Для систем «асфальтен–углеводород»  $A_H$  составляет порядка  $10^{-20}$  -  $10^{-19}$  Дж [2].

#### 4.3. Отталкивание: Электростатическая стабилизация

Асфальтены в нефти могут иметь заряженные фрагменты (например, кислородсодержащие группы, пиридины), что приводит к образованию двойного электрического слоя. Энергия электростатического отталкивания между двумя идентичными частицами в растворе с ионной силой  $I$  описывается как:

$$U_{\text{el}}(h) = \pi \epsilon \epsilon_0 R \zeta^2 \ln(1 + e^{-\kappa h})$$

где:  $\epsilon \epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $\zeta$  —  $\zeta$ -потенциал частиц (от  $-20$  до  $-60$  мВ);  $\kappa^{-1}$  — дебаевская длина, обратно пропорциональная ионной силе.

#### 4.4. Энергетический профиль

Комбинация этих двух вкладов формирует энергетический ландшафт, типично содержащий:

- первый минимум (глубокий) при малых расстояниях  $h_1$  — коагуляция (необратимая агрегация);
- максимум энергии  $U_{\text{barrier}}$  — энергетический барьер стабилизации;
- второй минимум (мелкий) при  $h_2 \sim 10\text{--}20$  нм — агрегация в

метастабильные комплексы (CCE).

Если  $U_{\text{barrier}} > 10\text{kT}$ , агрегаты считаются стабильными. Если  $U_{\text{barrier}} < 5\text{kT}$ , возможна коагуляция [3].

#### 4.5. Расчёт и моделирование

Для количественной оценки DLVO-профилей применяются как аналитические приближения, так и молекулярная динамика (MD), в частности с использованием потенциалов Леннард-Джонса и модифицированных форс-филдов (OPLS-AA, CHARMM) [4].

Методы моделирования позволяют:

- рассчитать критическую температуру и концентрацию агрегации (CAC);
- смоделировать распад агрегатов при воздействии УЗ или сдвига;
- предсказать условия самосборки и флокуляции.

#### 4.6. Альтернативные модели: Yen–Mullins и supramolecular $\pi$ -network

DLVO-модель хорошо объясняет стабильность CCE в простых системах, но не охватывает все аспекты агрегации в нефти. Современная Yen–Mullins модель описывает асфальтены как жесткие полидисперсные молекулы, формирующие:

- на мономерном уровне —  $\pi$ -связанные стек-stack кластеры (4–5 молекул),
- на агрегационном уровне — 10–100 нм суперструктуры, стабилизированные смолами [5].

При этом значение температуры агрегации ( $T_{\text{agg}}$ ) и критической концентрации осаждения ( $C_{\text{crit}}$ ) определяется тонким балансом растворимости, ароматичности среды и сольватации.

Энергетическая модель агрегации CCE в нефти представляет собой сложное взаимодействие притягивающих и отталкивающих сил. DLVO-механизм дает количественную основу для оценки стабильности, тогда как современная концепция надмолекулярной самосборки объясняет динамическую природу агрегатов и их реагирование на внешние поля. Эти

знания критичны для управления нефтью как коллоидной системой — от разрушения отложений до повышения нефтеотдачи пластов.

## **5. Экспериментальные данные по размерам ССЕ и методы их оценки**

Параметры, характеризующие размеры и морфологию сложных структурных единиц (ССЕ) в нефтяной дисперсной системе (НДС), представляют собой ключевую информацию для предсказания реологических свойств, стабильности и склонности нефти к агрегации и отложениям. Современные экспериментальные методы позволяют оценить как индивидуальные параметры агрегатов (радиус, масса, заряд), так и распределение их популяций в системе.

### **5.1. Динамическое светорассеяние (DLS)**

Метод Dynamic Light Scattering (DLS) применяется для измерения гидродинамического радиуса  $R_h$  частиц, основанного на их броуновском движении и флуктуациях рассеянного света. Основное уравнение, используемое в методе:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta R_h}$$

где:  $D$  — коэффициент диффузии агрегата;  $\eta$  — вязкость растворителя;  $R_h$  — радиус агрегата.

DLS позволяет обнаруживать агрегаты в диапазоне от 1 нм до 1000 нм. В работах González et al. (2006) и Gray et al. (2011) радиусы асфальтеновых агрегатов варьировались от 20 до 150 нм в зависимости от состава нефти, температуры и растворителя [1,2].

### **5.2. Просвечивающая электронная микроскопия (TEM)**

TEM (Transmission Electron Microscopy) даёт прямое изображение наноструктуры агрегатов. Асфальтены при осаждении на медную подложку формируют:

- агрегаты радиусом 50–300 нм, часто в виде квазисфер;
- кластеры, состоящие из нескольких десятков молекул,

упакованных по типу  $\pi$ – $\pi$  укладки;

- а также нити, сетчатые структуры, в зависимости от растворителя [3].

Однако артефакты сушки и вакуума могут влиять на размеры и морфологию.

### 5.3. Атомно-силовая микроскопия (AFM)

Метод AFM позволяет изучать агрегаты асфальтенов на подложке при нормальных условиях. Измеряется:

- высота и диаметр частиц (2D–3D-профиль),
- адгезионные и силовые характеристики.

Acevedo et al. (2004) зарегистрировали агрегаты высотой 10–40 нм, диаметром до 100 нм. Метод позволяет судить о твердости, плотности упаковки и подвижности мицелл [4].

### 5.4. Диффузионная ЯМР-спектроскопия (DOSY NMR)

DOSY NMR определяет коэффициенты диффузии индивидуальных молекул и агрегатов, что позволяет вычислить эффективный радиус и динамику обмена между фракциями:

- В смеси толуол–асфальтены радиусы достигают 30–120 нм;
- Метод применим *in situ*, без разрушения агрегатов [5].

### 5.5. Результаты и интерпретация: сравнительный анализ

Таблица 2 – Сравнительный анализ методов оценки ССЕ

Метод	Диапазон радиусов, нм	Особенности	Литературные данные
DLS	10–1000	В растворе, высокая чувствительность	González et al. (2006)
TEM	30–300	Высокое разрешение, требуется сушка	Mullins (2010)
AFM	10–200	Измерение формы, высоты	Acevedo et al. (2004)
DOSY NMR	20–150	Без разрушения, <i>in situ</i>	Gray et al. (2011)

## 5.6. Зависимость размеров ССЕ от факторов среды

Исследования показывают, что радиус агрегатов зависит от:

- полярности растворителя — с увеличением полярности размеры уменьшаются (толуол → гексан),
- температуры — рост температуры снижает размеры (распад агрегатов),
- смолистости нефти — смолы стабилизируют ССЕ, уменьшая склонность к коагуляции,
- внешнего воздействия (ультразвук) — обработка УЗО разрушает первичные агрегаты, снижая размер на 30–50 % [6].

Размеры ССЕ в нефти варьируются в широком диапазоне, отражая их динамическую природу и чувствительность к внешним условиям. Использование совокупности методов — DLS, TEM, AFM, NMR — позволяет всесторонне охарактеризовать агрегаты и построить энергетически обоснованные модели их поведения, что критично для прогноза вязкости, устойчивости и фильтрационных свойств нефти.

## Заключение (Conclusions)

Рассмотренная в работе совокупность экспериментальных и теоретических данных позволяет утверждать, что нефть представляет собой устойчивую коллоидно-дисперсную систему, в которой ключевую роль в формировании макроскопических свойств играют сложные структурные единицы (ССЕ) — надмолекулярные агрегаты асфальтенов, стабилизированные смолами и окружённые дисперсионной средой из лёгких углеводородов.

Формирование ССЕ обусловлено кумуляцией слабых межмолекулярных взаимодействий:

- $\pi$ – $\pi$ -сопряжений между ароматическими ядрами,
- водородных связей,

- ван-дер-ваальсовых притяжений,
- а также сольватационного и электростатического экранирования.

Энергетическая устойчивость агрегатов количественно описывается с использованием моделей DLVO и Yen–Mullins, позволяющих прогнозировать поведение системы при изменении температуры, состава растворителя, давления и других внешних воздействий. Типичный радиус ССЕ находится в пределах от 20 до 200 нм, однако он варьируется в зависимости от полярности среды, содержания смол и применения механических полей (например, ультразвука).

Применение инструментальных методов — DLS, TEM, AFM, DOSY NMR — позволило глубоко охарактеризовать морфологию агрегатов и подтвердить их динамическую природу. Эти методы показывают, что ССЕ могут существовать как в виде устойчивых дискретных наноструктур, так и в виде метастабильных флокулирующих образований, склонных к коагуляции.

Понимание энергетических и структурных характеристик ССЕ имеет ключевое значение для решения прикладных задач:

- снижение вязкости и повышение текучести нефти,
- управление отложениями АСПО в трубопроводах,
- повышение эффективности термических и акустических методов интенсификации нефтеотдачи,
- разработка рецептур растворителей и ингибиторов агрегации.

Таким образом, дальнейшее развитие методов изучения ССЕ, в сочетании с направленным физико-химическим воздействием, открывает путь к формированию новых технологических решений в области подготовки, транспорта и переработки тяжёлых и высоковязких нефтей.

### **Список литературы (References)**

1. Применение ThFFF для изучения наночастиц нативных асфальтенов / Е. А. Новиков, Ю. А. Сергеев, В. В. Санжаров [и др.]. // Нефтехимия. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 39–53. – DOI:

10.1134/S002824211901012X.

2. Значение молекулярной и надмолекулярной структуры асфальтенов / Н. С. Бурдельная, Л. С. Борисова, Д. А. Бушнев, А. А. Ильченко // *Petroleomics*. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 35–56. – DOI: 10.53392/27823857 2023 3 1 35.
3. Корнеев Д. С. Структурно-групповой состав и коллоидная стабильность асфальтенов при термоллизе нефти / Д. С. Корнеев. – Известия Томского политехнического университета. – 2025. – Т. 335, № 5. – С.
4. Викторов А. И. Особенности межмолекулярного взаимодействия асфальтенов и их агрегирования / А. И. Викторов, Н. А. Смирнова. – Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2024. – Электронный ресурс.
5. Zielinski L., Saha I., Freed D. E., Hürlimann M. D., Liu Y. Probing asphaltene aggregation in native crude oils with low-field NMR // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26, No. 7. – P. 5014–5021. – DOI: 10.1021/la904309k.
6. González G., et al. Effect of solvents on the structure of asphaltenes by DLS and SANS // *Fuel*. – 2006. – Vol. 85, No. 12. – P. 1811–1818. – DOI: 10.1016/j.fuel.2006.03.001.
7. Acevedo S., et al. AFM characterization of asphaltene aggregates // *Energy & Fuels*. – 2004. – Vol. 18, No. 5. – P. 1457–1463. – DOI: 10.1021/ef049891f.
8. Rogel E. Aggregation and phase behavior of asphaltenes in hydrocarbon media // *Fuel*. – 2000. – Vol. 79, No. 7. – P. 813–821. – DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00203-7.
9. Barré L., Simon S., Palermo T. Solution properties of asphaltenes // *Langmuir*. – 2008. – Vol. 24, No. 8. – P. 4017–4024.
10. Yaseen S. Y., Mansoori G. A. Asphaltene aggregation due to waterflooding: a molecular dynamics study // *arXiv*. – 2018. – June 26. – DOI: 10.48550/arXiv.1806.10011.