

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРИМОСТИ ХАНСЕНА ДЛЯ АСФАЛЬТЕНОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ (НА ПРИМЕРЕ АЛЖИРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

© 2020 г. М. Djabeur¹, Y. Bouhadda^{1, *}, T. Fergoug¹, A. C. Djendara¹, A. Hamimed²

¹Laboratoire de Chimie Physique des Macromolécules et interfaces biologiques Université de Mascara, Mascara, 29000 Algeria

²Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique Université de Mascara, Mascara, 29000 Algeria

*E-mail: y.bouhadda@univ-mascara.dz

Поступила в редакцию 20.08.2019 г.

После доработки 29.10.2019 г.

Принята к публикации 12.05.2020 г.

С помощью спектроскопии в ближней инфракрасной области в различных растворах толуол/нерастворитель было обнаружено возникновение коагуляции алжирских асфальтенов. С помощью ранжирования растворителей согласно методу сферы растворимости Хансена были определены и сопоставлены значения различных параметров растворимости экстрагированных асфальтенов и их компонентов. Было показано, что хлороформ и хинолин могут быть наилучшими растворителями для диспергирования полярных асфальтеновых фракций.

Ключевые слова: асфальтены, параметры растворимости Хансена, возникновение коагуляции

DOI: 10.31857/S002824212005007X

Асфальтены – самые тяжелые и наиболее полярные соединения нефти, которые, как полагают ученые, являются главной фракцией, ответственной за закупорку ствола скважины, загрязнение трубопроводов, а также отравление катализаторов, применяемых в нефтепереработке [1, 2]. Фактически, их определяют как фракцию ископаемого топлива, которая нерастворима в легких парафиновых растворителях, но растворима в ароматических [3]. Таким образом, их определение базируется исключительно на критерии растворимости. Они представляют собой сложную смесь различных соединений с различными химическими и структурными свойствами. Было разработано много моделей растворимости, инспирированных термодинамикой полимеров, для описания и предсказания коагуляции/осаждения асфальтенов; эти модели были адаптированы для асфальтенов с учетом их самоассоциации и полидисперсности молекулярно-массового распределения [4–6]. Как и для полимеров, для асфальтенов был определен параметр растворимости Гильдебранда δ . В этом параметре, который определяется как квадратный корень из плотности энергии когезии, учитываются исключительно дисперсионные силы, и он идеально подходит для характеристики асфальтенов, поскольку более 90% их массы состоит из атомов углерода и водорода [7, 8]. Однако, как показало множество работ, гетероатомы также вносят значительный вклад в процесс коагуля-

ции, поэтому параметр растворимости Гильдебранда был заменен на параметр растворимости Хансена [9, 10]. В этом параметре разделяют плотность энергии когезии, использованную при определении параметра Гильдебранда, с точки зрения вклада дисперсионных δ_d - и дипольных δ_p -взаимодействий и водородных связей δ_h . Кроме того, для сложной системы Хансен предложил так называемый метод сферы растворимости, который позволяет предсказать параметры растворимости только на основе исследования растворения образца в ряду хороших и плохих растворителей [10–12]. Фактически, благодаря исследованию растворения, была определена граница сферы растворимости такой сложной системы, как асфальтены. Эта характеристика позволяет оценить сродство любой асфальтеновой фракции к любому растворителю всего лишь благодаря значению параметра R_a , выраженному Skaagur и Hansen [10] как:

$$R_a = \left[4(\delta_{d1} - \delta_{d2})^2 + (\delta_{p1} - \delta_{p2})^2 + (\delta_{h1} - \delta_{h2})^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где 1 и 2 обозначают асфальтены и растворитель соответственно, а δ_d , δ_p и δ_h – вклады дисперсионных и дипольных взаимодействий и водородных связей в растворимость соответственно. Малое значение R_a , близкое к нулю, свидетельствует о том, что вещества имеют высокое сродство друг к другу. Толуол и *n*-гептан могут быть использова-

ны в качестве эталонных растворителей для определения растворимости асфальтена в каком-либо растворителе. Так, например, все растворители со значением R_a большим, чем у *n*-гептана, должны быть нерастворителями для соответствующих асфальтенов, в то время как все растворители со значением R_a меньшим, чем у толуола, должны быть более диспергирующими растворителями.

Таким образом, необходимо определить параметры растворимости Хансена для данных асфальтенов и их компонентов. Исследование изменения этих параметров наряду с фракционированием асфальтенов должно быть крайне полезно для определения реального вклада каждого компонента в явление коагуляции и для определения наиболее подходящих диспергентов и нерастворителей для данной фракции асфальтенов или битума. В недавнем исследовании Sato T. с соавт. [13] были определены параметры растворимости Хансена двух асфальтенов по результатам исследования растворимости более чем в 33 чистых растворителях (хороших и плохих). Используя метод сферы растворимости, были определены значения: $\delta_d = 19.1$, $\delta_p = 4.2$ и $\delta_h = 4.4$ МПа^{1/2}. Также Redelius P. [14] тем же методом изучил венесуэльский битум, для которого наиболее подходящими параметрами растворимости Хансена были значения: $\delta_d = 18.4$, $\delta_p = 3.9$ и $\delta_h = 3.6$ МПа^{1/2}.

В данной работе определены параметры растворимости алжирских асфальтенов, извлеченных из остатка, и их компонентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экстракция и фракционирование асфальтенов.

Асфальтены были экстрагированы с помощью осаждения *n*-гептаном (40 мл *n*-гептана на 1 г образца) из образца нефти месторождения Hassi Messaoud (A_0). Смесь оставляли на ночь при комнатной температуре при постоянном перемешивании. Нерастворимую часть получали с помощью фильтрации через мембрану с диаметром пор 0.45 мкм, а затем растворяли в необходимом количестве толуола. Затем толуольный раствор повторно фильтровали с помощью такой же мембраны и упаривали на ротационном испарителе. Дополнительно для удаления следовых количеств толуола осадок сушили в автоклаве с воздушной средой при 110°C в течение недели. Для получения фракции A_2 извлеченный образец A_1 очищали в экстракторе Сокслета *n*-гептаном в течение 8 ч. Нерастворимые асфальтены A_2 помещали в две пробирки, первая содержала *n*-бутанол, а вторая — ацетон, в соотношении 40 мл растворителя на 1 г асфальтенов A_2 в каждой, а затем выдерживали в течение ночи при комнатной температуре при перемешивании. Растворы фильтровали через мембрану того же типа, после чего исследовали не-

растворимые фракции из обоих растворов, обозначаемые как A_3 для ацетона и A_4 для бутанола.

Исследование коагуляции. Определение начала коагуляции проводилось с помощью УФ-видимого спектрометра Spесord 210 при длине волны $\lambda = 1100$ нм (ближняя область ИК-диапазона) с помощью добавления *n*-гептана (*n*-C₇) с постоянной скоростью (1мл/3 мин) к раствору асфальтенов в толуоле, помещенному в ячейку для титрования (длина 10 мм). Поглощение определяется как функция от объема *n*-C₇, добавленного к исходному раствору.

Расчетная часть. Согласно Гильдебранду, определение параметра растворимости жидкости δ [(МПа)^{1/2}] может быть выражено как функция от энергии когезии и молярного объема:

$$\delta = \left(\frac{E}{V}\right)^{1/2}. \quad (2)$$

Однако, Хансен разделил энергию когезии E параметра растворимости Гильдебранда на три составляющие: энергию дисперсионных взаимодействий E_d , дипольных моментов E_p и водородных связей E_h . Сумма этих вкладов может быть выражена с помощью следующего уравнения:

$$E = E_d + E_p + E_h. \quad (3)$$

Таким образом, параметр растворимости Хансена δ_{HSP} будет записан как

$$\delta_{HSP}^2 = (\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2), \quad (4)$$

где δ_d , δ_p и δ_h в [(МПа)^{1/2}] — вклад дисперсионных и дипольных взаимодействий и водородных связей в растворимость соответственно. Каждое слагаемое δ_{HSP} может быть определено с помощью титриметрии с подходящим нерастворителем (дисперсионный нерастворитель для δ_d , полярный для δ_p и с водородными связями δ_h).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены данные элементного (С, Н, N, O) анализа асфальтенов A_1 и их составляющих, где мы отметили небольшие различия в соотношении Н/С в различных фракциях.

На рис. 1 показана кривая титрования асфальтенов A_1 при длине волны $\lambda = 1100$ нм, где поглощение снижается с увеличением объема растворителя *n*-C₇. В начале титрования преобладает разбавление, а поглощение снижается до определенного объема, где достигается минимум, соответствующий началу коагуляции.

Изначально поглощение возрастает с увеличением количества *n*-гептана (*n*-C₇) [17, 18]. Для лучшей оценки начала коагуляции используется график, показанный во вставке на рис. 1. Изменение данных выражено как функция поглощения (A)

от концентрации (C). Это представление позволяет оценить линейность зависимости A от C и таким образом определить концентрационный диапазон, в котором выполняется закон Бера. В исследованиях оптического поглощения известно, что отклонения от простого закона Бера свидетельствуют о межмолекулярном взаимодействии или агрегации [18].

Во всех титриметрических экспериментах объем коагулянта F (нерастворитель) и разбавителя d (растворитель) в начальный момент коагуляции можно оценить по следующим уравнениям:

$$\varphi_d = \frac{V_d}{V_d + V_F}, \tag{5}$$

$$\varphi_F = \frac{V_F}{V_d + V_F}, \tag{6}$$

а, следовательно, можно определить параметр растворимости смеси (растворитель и нерастворитель) δ_m :

$$\delta_m = \sum \varphi_i \delta_i. \tag{7}$$

В первом приближении в начальный момент коагуляции параметр растворимости асфальтенов можно приравнять к параметру растворимости смеси. Однако значение δ_m , полученное таким образом, зависит от концентрации и должно быть переоценено с помощью титрования при разных концентрациях асфальтенов. Для достижения этой цели проводят серию титриметрических экспериментов при различных концентрациях асфальтенов для определения объема V_F при начале коагу-

Таблица 1. Химический состав различных асфальтеновых фракций

| Образец | N, % | C, % | H, % | O, % | H/C |
|----------------|------|-------|------|------|------|
| A ₁ | 1.00 | 88.00 | 6.01 | 4.99 | 0.81 |
| A ₂ | 0.20 | 87.08 | 6.69 | 6.03 | 0.91 |
| A ₃ | 0.12 | 86.33 | 6.39 | 7.16 | 0.88 |
| A ₄ | 0.30 | 90.07 | 6.94 | 2.69 | 0.91 |

ляции. Таким образом, раствор асфальтенов A_1 был оттитрован не только n -гептаном, а также четырьмя разными нерастворителями (n -пентаном (n -C₅), n -гексаном (n -C₆), ацетоном и бутанолом-1) при трех разных концентрациях (0.1, 0.5 и 1 мас. %). Для асфальтеновых фракций A_2 , A_3 и A_4 проводилось титрование только n -C₇ при трех разных концентрациях, упомянутых ранее.

С помощью объемов V_F при начале коагуляции рассчитываются величины F_R и C :

$$F_R = V_F / (V_d + V_F) \text{ и } C = W_A / (V_d + V_F), \tag{8}$$

где V_d – объем диспергирующего растворителя, V_F – объем коагулянта при начале коагуляции для заданной концентрации, а W_A – массовая доля асфальтена в образце, мас. %. На графике зависимости F_R от C , как показано на рис. 2, должна быть получена прямая линия, пересекающая ось ординат при значении F_{Ry} . Параметр F_{Ry} является мерой отношения нерастворителя к общему объему, при котором асфальтены не растворимы при нулевой или какой-либо другой концентрации.

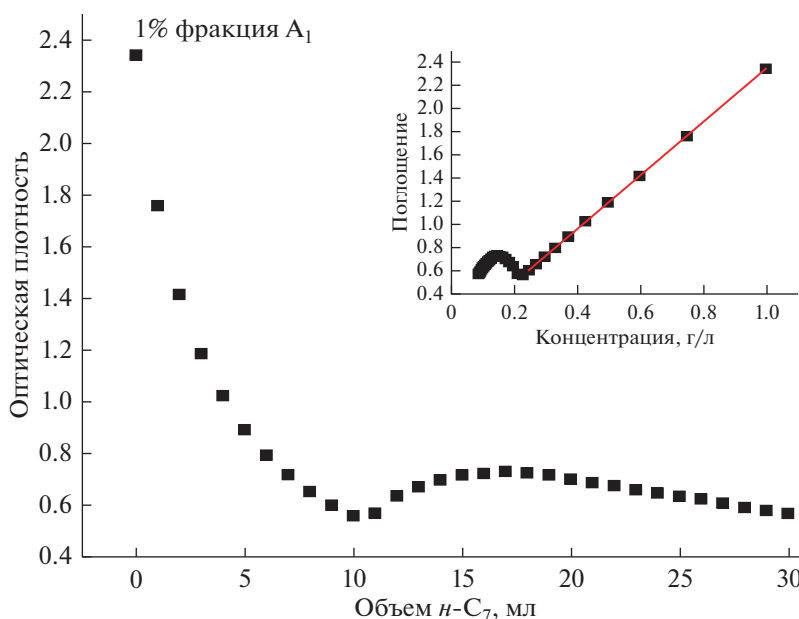


Рис. 1. Зависимость изменения поглощения фракции асфальтенов A_1 от объема n -гептана и от концентрации (во вставке).

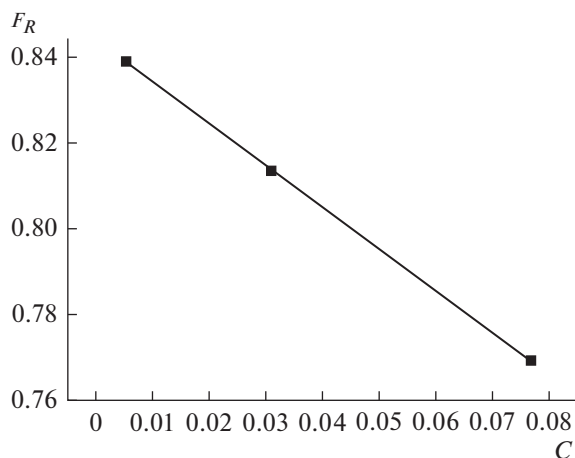


Рис. 2. Зависимость F_R от C для фракции асфальтенов A_1 .

Таблица 2. Параметры растворимости Хансена различных фракций асфальтенов (в МПа^{1/2}), полученные с помощью: A – уравнения (7); B – уравнения (11)

| A | | | | | |
|--------------------------|----------------|------------|------------|------------|----------------|
| Титрант | Фракция | δ_d | δ_p | δ_h | δ_m |
| <i>n</i> -C ₅ | A ₁ | 15.30 | 0.35 | 0.5 | 15.31 |
| <i>n</i> -C ₆ | | 15.48 | 0.26 | 0.38 | 15.49 |
| Ацетон | | 16.57 | 6.53 | 4.85 | 18.46 |
| Бутанол-1 | | 16.5 | 4.62 | 11.91 | 20.86 |
| <i>n</i> -C ₇ | | 15.9 | 0.22 | 0.32 | 15.90 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₂ | 16.3 | 0.44 | 0.64 | 16.31 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₃ | 16.27 | 0.43 | 0.62 | 16.29 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₄ | 16.2 | 0.39 | 0.56 | 16.21 |
| B | | | | | |
| Титрант | Фракция | δ_d | δ_p | δ_h | δ_{HSP} |
| <i>n</i> -C ₅ | A ₁ | 18.57 | 3.62 | 3.77 | 19.29 |
| <i>n</i> -C ₆ | | 18.59 | 3.37 | 3.48 | 19.21 |
| Ацетон | | 20.35 | 10.30 | 8.62 | 24.39 |
| Бутанол-1 | | 20.08 | 8.20 | 15.49 | 26.65 |
| <i>n</i> -C ₇ | | 18.85 | 3.18 | 3.27 | 19.40 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₂ | 19.34 | 3.49 | 3.68 | 19.99 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₃ | 19.31 | 3.47 | 3.65 | 19.96 |
| <i>n</i> -C ₇ | A ₄ | 19.22 | 3.41 | 3.58 | 19.84 |

Из значения F_{Ry} с помощью уравнения (7) возможно определить значение δ_m вне зависимости от концентрации асфальтенов. В табл. 2 приведены соответствующие значения δ_m .

Однако для того, чтобы определить истинный параметр растворимости асфальтенов, используется уравнение Флори–Хаггинса для истинных растворов:

$$\chi = \frac{v_m}{RT} (\delta_a - \delta_m)^2, \quad (9)$$

где χ – критический параметр, R , T и v_m – универсальная газовая постоянная, абсолютная температура и молярный объем смеси растворителей соответственно. Значение v_m вычисляется согласно уравнению (10), где v_i соответствует молярному объему i -того растворителя:

$$v_m = \frac{\phi_F + \phi_d}{\frac{\phi_F}{v_F} + \frac{\phi_d}{v_d}}. \quad (10)$$

Согласно работам Donaggio F. [15] и Painter P. [16], в критических условиях параметр взаимодействия $\chi = 0.5$, а значение параметра растворимости Хансена δ_{HSP} для асфальтенов может быть выражен как:

$$\delta_{HSP} \approx \left(\frac{RT}{2v_m} \right)^{1/2} + \delta_m. \quad (11)$$

В табл. 2 приведены значения, соответствующие параметру растворимости Хансена δ_{HSP} различных фракций асфальтенов при начале коагуляции, полученные с помощью уравнения (11).

По-видимому, фракции A_2 и A_3 являются почти идентичными, поскольку полученные для них значения близки. Это означает, что фракционирование ацетоном не позволило извлечь значительное количество полярных соединений из фракции A_2 . Значение δ_{HSP} изменяется в зависимости от природы коагулянта (от 19.21 до 19.99 для неполярных растворителей и свыше 24.39 МПа^{1/2} для полярных или растворителей с водородными связями). Такое поведение соответствует данным, которые опубликовали другие исследователи, использующие метод сферы растворимости Хансена [12, 13, 19].

Rogel E. с соавт. [19] измеряли плотности и параметры растворимости Гильдебранда пяти разных асфальтенов, полученных из угля, нефти и сланцевой нефти. Авторы отметили, что у всех образцов распределение значения параметра растворимости похоже на нормальное (по Гауссу) и различается в зависимости от природы асфальтенов (нормальное распределение для нефтяных и угольных, бимодальное для сланцевых) и полярности элюента.

Таблица 3. Параметр растворимости Хансена для асфальтенов A_1 и различных растворителей и нерастворителей

| Растворитель или фракция асфальтенов | δ_d | δ_p | δ_h | δ_{HSP} | R_a | Ранг |
|---|--------------|--------------|-------------|----------------|-------------|-----------|
| A_1 | 18.85 | 3.18 | 3.27 | 19.39 | 0 | 1 |
| Толуол | 18.00 | 1.400 | 2.00 | 18.16 | 2.76 | 2 |
| Ксилол | 17.80 | 1.00 | 3.10 | 18.09 | 3.03 | 3 |
| Хлороформ | 17.80 | 3.10 | 5.70 | 18.94 | 3.21 | 4 |
| Бензол | 18.40 | 0.00 | 2.00 | 18.50 | 3.54 | 5 |
| Этилбензол | 17.80 | 0.60 | 1.40 | 17.86 | 3.81 | 6 |
| Хинолин | 20.50 | 5.60 | 5.70 | 22.00 | 4.75 | 7 |
| Бензальдегид | 19.40 | 7.40 | 5.30 | 21.42 | 4.81 | 8 |
| Дисульфид углерода | 20.20 | 0.00 | 0.60 | 20.20 | 4.95 | 9 |
| Циклогексан | 16.80 | 0.00 | 0.20 | 16.80 | 6.02 | 10 |
| Пиридин | 19.00 | 8.80 | 5.90 | 21.75 | 6.21 | 11 |
| Тetraгидрофуран (ТГФ) | 16.80 | 5.70 | 8.00 | 19.46 | 6.74 | 12 |
| Метилизобутилкетон (МИБК) | 15.30 | 6.10 | 4.10 | 16.97 | 7.72 | 13 |
| Нитробензол | 20.00 | 10.60 | 3.10 | 22.84 | 7.77 | 14 |
| <i>n</i>-Гептан | 15.50 | 0.00 | 0.00 | 15.50 | 8.10 | 15 |
| Метилэтилкетон (МЭК) | 16.00 | 9.00 | 5.10 | 19.05 | 8.34 | 16 |
| Анилин | 20.10 | 5.80 | 11.20 | 23.72 | 8.71 | 17 |
| <i>n</i> -Гексан | 14.90 | 0.00 | 0.00 | 14.90 | 9.12 | 18 |
| <i>n</i> -Пентан | 14.50 | 0.00 | 0.00 | 14.50 | 9.82 | 19 |
| N-Метил-2-пирролидон (НМП) | 18.00 | 12.30 | 7.20 | 22.95 | 10.07 | 20 |
| Ацетон | 15.50 | 10.40 | 7.00 | 19.93 | 10.53 | 21 |
| Бутанол-1 | 16.00 | 5.70 | 15.80 | 23.19 | 13.99 | 22 |

Также они сообщили, что несмотря на изменения значений соотношения Н/С в асфальтенах и значительные различия в ширине пика распределения, средние значения параметров растворимости всех асфальтенов находятся в узком диапазоне (19.8–20.4 МПа^{1/2}) для неполярных растворителей (легких парафинов).

В табл. 3–6 показаны значения параметра растворимости Хансена для всех фракций асфальтенов, обработанных *n*-гептаном вместе с одним из тех растворителей, которые были использованы в

этой работе. Из значений параметра Хансена R_a легко заметить, что толуол является одним из лучших растворителей для необработанных асфальтенов. При сравнении других фракции с A_1 интересно отметить, что хлороформ и хинолин имеют более высокий ранг, что подчеркивает сходство этих растворителей с полярными асфальтенами. *n*-Гептан, несмотря на то, что состав фракций изменился, в основном сохраняет свой ранг и, следовательно, свой эффект коагулянта для асфальтенов.

Таблица 4. Параметры растворимости Хансена для асфальтенов A_2 и различных растворителей и нерастворителей

| Растворитель или фракция асфальтенов | δ_d | δ_p | δ_h | δ_{HSP} | R_a | Ранг |
|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-----------|
| A_2 | 19.34 | 3.49 | 3.68 | 19.99 | 0 | 1 |
| Хлороформ | 17.80 | 3.10 | 5.70 | 18.94 | 3.70 | 2 |
| Хинолин | 20.50 | 5.60 | 5.70 | 22.00 | 3.73 | 3 |
| Толуол | 18.00 | 1.40 | 2.00 | 18.16 | 3.79 | 4 |
| Ксилол | 17.80 | 1.00 | 3.10 | 18.09 | 4.00 | 5 |
| Бензальдегид | 19.40 | 7.40 | 5.30 | 21.42 | 4.23 | 6 |
| Бензол | 18.40 | 0.00 | 2.00 | 18.50 | 4.30 | 7 |
| Этилбензол | 17.80 | 0.60 | 1.40 | 17.86 | 4.79 | 8 |
| Дисульфид углерода | 20.20 | 0.00 | 0.60 | 20.20 | 4.96 | 9 |
| Пиридин | 19.00 | 8.80 | 5.90 | 21.75 | 5.79 | 10 |
| ТГФ | 16.800 | 5.70 | 8.00 | 19.46 | 7.02 | 11 |
| Циклогексан | 16.80 | 0.00 | 0.20 | 16.80 | 7.07 | 12 |
| Нитробензол | 20.00 | 10.60 | 3.10 | 22.84 | 7.25 | 13 |
| Анилин | 20.10 | 5.80 | 11.20 | 23.72 | 8.01 | 14 |
| МИБК | 15.30 | 6.10 | 4.10 | 16.97 | 8.50 | 15 |
| МЭК | 16.00 | 9.00 | 5.10 | 19.05 | 8.77 | 16 |
| <i>n</i>-Гептан | 15.50 | 0.00 | 0.00 | 15.50 | 9.20 | 17 |
| НМП | 18.00 | 12.30 | 7.20 | 22.95 | 9.85 | 18 |
| <i>n</i> -Гексан | 14.90 | 0.00 | 0.00 | 14.90 | 10.22 | 19 |
| Ацетон | 15.50 | 10.40 | 7.00 | 19.93 | 10.85 | 20 |
| <i>n</i> -Пентан | 14.50 | 0.00 | 0.00 | 14.50 | 10.92 | 21 |
| Бутанол-1 | 16.00 | 5.70 | 15.80 | 23.19 | 14.01 | 22 |

Итак, основываясь на надежности метода сферы растворимости Хансена, мы классифицировали различные растворители с точки зрения их средств к асфальтенам с различной полярностью. В тех случаях, когда полярность асфальтена возрастает, толуол перестает быть наилучшим диспергирующим растворителем, а хлороформ и хинолин оказываются более подходящими. С другой стороны, *n*-гептан остается предпочтительным растворителем для коагуляции.

Таблица 5. Параметры растворимости Хансена для асфальтенов A_3 и различных растворителей и нерастворителей

| Растворитель или фракция асфальтенов | δ_d | δ_p | δ_h | δ_{HSP} | R_a | Ранг |
|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-----------|
| A_3 | 19.31 | 3.47 | 3.65 | 19.95 | 0 | 1 |
| Хлороформ | 17.80 | 3.10 | 5.70 | 18.94 | 3.66 | 2 |
| Толуол | 18.00 | 1.40 | 2.00 | 18.16 | 3.72 | 3 |
| Хинолин | 20.50 | 5.60 | 5.70 | 22.00 | 3.79 | 4 |
| Ксилол | 17.80 | 1.00 | 3.10 | 18.09 | 3.94 | 5 |
| Бензол | 18.40 | 0.00 | 2.00 | 18.50 | 4.25 | 6 |
| Бензальдегид | 19.40 | 7.40 | 5.30 | 21.42 | 4.26 | 7 |
| Этилбензол | 17.80 | 0.60 | 1.40 | 17.86 | 4.73 | 8 |
| Дисульфид углерода | 20.20 | 0.00 | 0.60 | 20.20 | 4.95 | 9 |
| Пиридин | 19.00 | 8.80 | 5.90 | 21.75 | 5.81 | 10 |
| ТГФ | 16.80 | 5.70 | 8.00 | 19.46 | 7.00 | 11 |
| Циклогексан | 16.80 | 0.00 | 0.20 | 16.80 | 7.01 | 12 |
| Нитробензол | 20.00 | 10.60 | 3.10 | 22.84 | 7.28 | 13 |
| Анилин | 20.10 | 5.80 | 11.20 | 23.72 | 8.05 | 14 |
| МИБК | 15.30 | 6.10 | 4.10 | 16.97 | 8.45 | 15 |
| МЭК | 16.00 | 9.00 | 5.100 | 19.05 | 8.74 | 16 |
| <i>n</i>-Гептан | 15.50 | 0.00 | 0.00 | 15.50 | 9.13 | 17 |
| НМП | 18.00 | 12.30 | 7.20 | 22.95 | 9.87 | 18 |
| <i>n</i> -Гексан | 14.90 | 0.00 | 0.00 | 14.90 | 10.15 | 19 |
| Ацетон | 15.50 | 10.40 | 7.00 | 19.93 | 10.83 | 20 |
| <i>n</i> -Пентан | 14.50 | 0.00 | 0.00 | 14.50 | 10.85 | 21 |
| Бутанол-1 | 16.00 | 5.70 | 15.80 | 23.19 | 14.01 | 22 |

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят University of Mascara, Algeria и DGRSDT, Algeria за финансовую и техническую поддержку.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Таблица 6. Параметры растворимости Хансена для асфальтенов А₄ и различных растворителей и нерастворителей

| Растворитель или фракция асфальтенов | δ_d | δ_p | δ_h | δ_{HSP} | R_a | Ранг |
|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-----------|
| А ₄ | 19.22 | 3.41 | 3.58 | 19.84 | 0 | 1 |
| Толуол | 20.50 | 5.60 | 5.70 | 18.16 | 3.53 | 2 |
| Хлороформ | 19.40 | 7.40 | 5.30 | 18.94 | 3.55 | 3 |
| Ксилол | 17.80 | 3.10 | 5.70 | 18.09 | 3.75 | 4 |
| Хинолин | 20.20 | 0.00 | 0.60 | 22.00 | 3.98 | 5 |
| Бензол | 19.00 | 8.80 | 5.90 | 18.50 | 4.10 | 6 |
| Бензальдегид | 18.0 | 1.40 | 2.00 | 21.42 | 4.35 | 7 |
| Этилбензол | 17.80 | 1.00 | 3.10 | 17.86 | 4.55 | 8 |
| Дисульфид углерода | 18.400 | 0.00 | 2.00 | 20.20 | 4.93 | 9 |
| Пиридин | 17.80 | 0.60 | 1.40 | 21.75 | 5.88 | 10 |
| Циклогексан | 20.00 | 10.60 | 3.10 | 16.80 | 6.81 | 11 |
| ТГФ | 20.10 | 5.80 | 11.20 | 19.46 | 6.94 | 12 |
| нитробензол | 16.80 | 5.7 | 8.00 | 22.84 | 7.37 | 13 |
| Анилин | 16.80 | 0.00 | 0.20 | 23.72 | 8.17 | 14 |
| МИБК | 18.00 | 12.30 | 7.20 | 16.97 | 8.30 | 15 |
| МЭК | 16.0 | 9.0 | 5.10 | 19.05 | 8.66 | 16 |
| н-Гептан | 15.30 | 6.10 | 4.10 | 15.50 | 8.93 | 17 |
| НМП | 15.50 | 0.00 | 0.00 | 22.96 | 9.90 | 18 |
| н-Гексан | 15.50 | 10.40 | 7.00 | 14.9 | 9.95 | 19 |
| н-Пентан | 14.90 | 0.00 | 0.00 | 14.5 | 10.65 | 20 |
| Ацетон | 14.50 | 0.00 | 0.00 | 19.94 | 10.76 | 21 |
| Бутанол-1 | 160 | 5.70 | 15.80 | 23.20 | 14.00 | 22 |

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Djabeur Mansour, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4090-7240>

Ali Cherif Djendara, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-6960>

Teffaha Fergoug, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5133-4324>

Youcef Bouhadda, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-7453>

Abderrahmane Hamimed, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3141-6813>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buckley J.S. // *Energy Fuels*. 2012. V. 26. P. 4086.
2. Goual L., Sedghi M., Wang X., Zhu Z. // *Langmuir*. 2014. V. 30. P. 5394.
3. Bouhadda Y., Bendedouch D., Sheu E., Krallafa A. // *Energy Fuels*. 2000. V. 14. P. 845.
4. Hirschberg A., De Jong L.N.J., Schipper B.A., Meijer J.G. // *Soc. Pet. Eng. J.* 1984. V. 24. P. 283.
5. Victorov A.I., Firoozabadi A. // *AIChE J.* 1996. V. 42. P. 1753.
6. Kawanaka S., Leontaritis K.J., Park S.J., Mansoori G.A. In "Oil Field Chemistry", ACS Symposium Series No. 396, Chapter 24. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1989.
7. Hildebrand J.H. *The Solubility of Non-Electrolytes*. Reinhold. New York, 1950.
8. Hildebrand J.H., Scott R.L. *Regular Solutions*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1962.
9. Hansen C.M. // *J. Paint Technol.* 1967. V. 39. № 505. P. 104.
10. Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook. Ed. by Hansen C. London: CRC Press, 1999.
11. Wieneke J.U., Kommoß B., Gaer O., Prykhodko I., Ulbricht M. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012. V. 51. P. 327.
12. Morimoto M., Fukatsu N., Tanaka R., Takanohashi T., Kumagai H., Morita T., Tykwinski R.R., Scott D.E., Stryker J.M., Gray M.R., Sato T., Yamamoto H. // *Energy Fuels*. 2018. V. 32. № 11. P. 11296.
13. Sato T., Araki S., Morimoto M., Tanaka R., Yamamoto H. // *Energy Fuels*. 2014. V. 28. P. 891.
14. Redelius P. // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. P. 1087.
15. Donaggio F., Correr S., Lockhart T.P. // *Petrol. Sci. Technol.* 2001. V. 19. № 1–2. P. 129.
16. Painter P., Veytsman B., Youtcheff J. // *Energy Fuels*. 2015. V. 29. P. 2120.
17. Reichert C., Klein L.L., Fuhr B.J. // *J. Can. Petrol. Technol.* 1986. V. 25. № 33. P. 120.
18. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Akhmetov B.R. // *J. Petrol. Sci. Eng.* 2003. V. 37. P. 135.
19. Rogel E., Ovalles C., Bake K.D., Zuo J.Y., Dumont H., Pomerantz A.E., Mullins O.C. // *Energy Fuels*. 2016. V. 30. № 11. P. 9132.