

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.

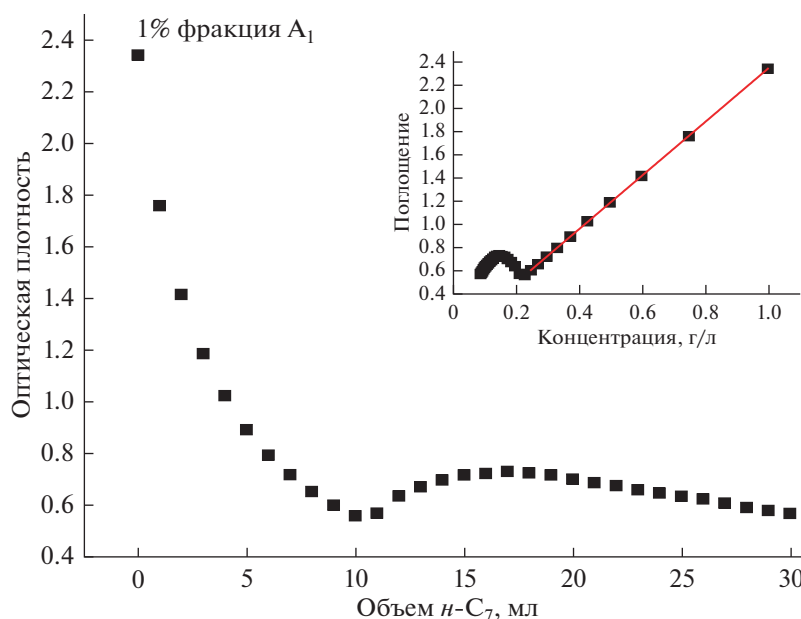


Рис. 1. Зависимость изменения поглощения фракции асфальтенов A_1 от объема n -гептана и от концентрации (во вставке).

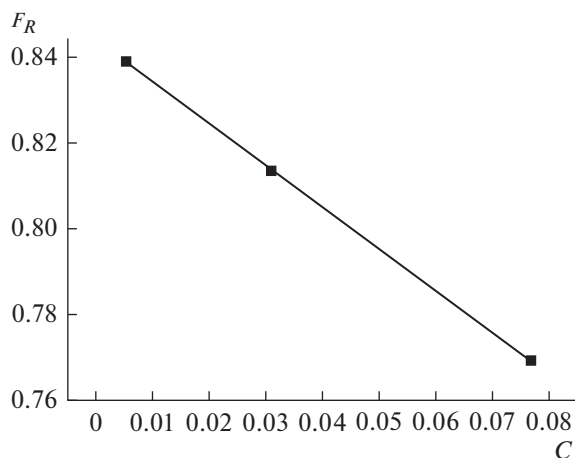


Рис. 2. Зависимость F_R от C для фракции асфальтенов A_1 .

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.