

УДК 541.1; 622.276

DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-147-158

Необычные закономерности взаимодействия асфальтенов с апротонными растворителями

С. А. Шуткова^{1*}, М. Ю. Доломатов², А. Г. Телин³

¹Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

³ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа, Россия

*svetlana-shutkova@yandex.ru

Аннотация. Применение органических растворителей для удаления асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) является одним из самых распространенных методов в технологических процессах добычи, транспорта, хранения и переработки высокосмолистых нефтей. Несмотря на определенные результаты, проблема направленного подбора растворителя с учетом природы нефти и АСПО в конкретных условиях далека от разрешения. Целью данной работы является проверка гипотезы о взаимосвязи растворимости асфальтенов с их средним сродством к электрону и энергией ионизации растворителей. С использованием изотермы растворимости асфальтенов в неионогенных растворителях оценена растворимость образцов асфальтенов западносибирской нефти и модельных фрагментов. Исследования показали, что максимальной растворимостью обладают асфальтены с высоким эффективным сродством к электрону. Наибольшую растворяющую способность имеют растворители с низким потенциалом ионизации, что подтверждает термодинамику растворимости через образование донорно-акцепторных комплексов. Выполненные исследования помогут промышленным специалистам и инженерам сервисных компаний в научно обоснованном подборе растворителя в зависимости от типа отложений тяжелых компонентов нефти.

Ключевые слова: асфальтены, растворители, растворимость, комплексы с переносом заряда, энергия ионизации, сродство к электрону

Для цитирования: Шуткова, С. А. Необычные закономерности взаимодействия асфальтенов с апротонными растворителями / С. А. Шуткова, М. Ю. Доломатов, А. Г. Телин. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-4-147-158 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 4. – С. 147–158.

Unusual patterns of interaction of asphaltenes with aprotic solvents

Svetlana A. Shutkova^{1*}, Mikhail Yu. Dolomatov², Alexey G. Telin³

¹Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

²Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

³Ufa Scientific and Technical Center LLC, Ufa, Russia

*svetlana-shutkova@yandex.ru

Abstract. Application of organic solvents for removal of asphalt-tar-paraffin deposits is one of the most widespread methods in technological processes of production, transportation, storage and processing of high-resin oils. In spite of certain results, the problem of directional solvent selection taking into account the nature of oil and asphalt-tar-paraffin deposits in specific conditions is far from being solved. The aim of the article is to test the hypothesis of the relationship between the solubility of asphaltenes and their average electron affinity and solvent ionization energy. Using the solubility isotherm of asphaltenes in non-ionogenic solvents, the solubility of West Siberian oil asphaltene samples and model fragments was evaluated. The studies have shown that asphaltenes with high effective electron affinity have the maximum solubility. Solvents with low ionization potential have the highest solubility, which confirms the thermodynamics of solubility through the formation of donor-acceptor complexes. The performed studies will help field specialists and engineers of service companies in scientifically justified selection of solvent depending on the type of deposits of heavy components of oil.

Keywords: asphaltenes, solvents, solubility, charge transfer complexes, ionization energy, electron affinity

For citation: Shutkova, S. A., Dolomatov, M. Yu., & Telin, A. G. (2024). Unusual patterns of interaction of asphaltenes with aprotic solvents. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 147-158. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-147-158

Введение

Использование органических растворителей для удаления асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) является широко применяемым приемом в технологии разработки месторождений, транспорта, хранения и переработки высокосмолистых нефтей [1, 2]. Актуальность этого процесса не потеряла своего значения и в настоящее время, многие добывающие компании и предприятия нефтехимического сервиса постоянно разрабатывают более эффективные и дешевые растворители и способы их закачки [3].

Известно, что АСПО являются сложной органической смесью, состоящей из парафинов (20–70 % по массе), асфальто-смолистых веществ (20–40 % по массе), масел, воды и механических примесей. К классу асфальто-смолистых веществ относятся асфальтены и тяжелые смолы, которые являются наиболее высокомолекулярной и малорастворимой частью АСПО [4].

Кроме того, процессы растворения и осаждения асфальтенов являются основными в технологии деасфальтизации нефтяных остатков в переработке нефти. Показано, что растворимость асфальтенов и асфальто-смолистых веществ качественно отличаются от растворимости низкомолекулярных веществ и полимеров [5]. В работе М. Ю. Доломатова, И. Р. Хайрудинова, Ф. Г. Унгера и Д. Ф. Варфоломеева [6] впервые была обнаружена зависимость растворимости асфальтенов от энергии ионизации растворителя.

Кроме того, было обнаружено, что эта зависимость не выполняется для растворителей с объемными заместителями в молекулах. Это, вероятно, связано со стерическими затруднениями доступа объемных молекул растворителей к активным электроноакцепторным центрам асфальтенов. За-

кономерность была применена для способа определения энергии ионизации органических молекул [7]. Показана особая роль донорно-акцепторных химических взаимодействий при растворимости асфальтенов. Таким образом, зависимость растворимости асфальтенов от энергии ионизации сольвента является доказательством образования молекулярных донорно-акцепторных комплексов в системе асфальтены — растворитель.

М. Ю. Долomatовым, А. Г. Телиным и Н. И. Хисамутдиновым, исходя из упомянутых выше представлений о донорно-акцепторных взаимодействиях, получена изотерма растворимости [8] асфальто-смолистых веществ в неионогенных растворителях.

Используя результаты этих исследований, авторы [9] пришли к созданию технологии направленного выбора сольвентов для удаления асфальтенов. В работе М. Ю. Долomatова и М. К. Рогачева изотерма была улучшена на основе адгезионной термодинамической модели донорно-акцепторного взаимодействия малорастворимых твердых веществ с неионогенными растворителями [10].

Целью данной работы является проверка гипотезы о взаимосвязи растворимости асфальтенов с их средним сродством к электрону и энергией ионизации растворителей и оценка растворимости асфальтенов в различных растворителях с использованием изотермы растворимости.

Объекты исследования

Объектами исследования являются асфальтены западносибирской нафтенароматической нефти, включающей гетероатомы.

Методы исследования

Для выделения асфальто-смолистых веществ использовали методику Гольде. Затем смолы отделяли от асфальтенов по методике И. Р. Хайрудинова [9].

Средняя электронная структура асфальтенов исследована методом феноменологической электронной спектроскопии по широкому сигналу спектра в диапазоне от 280–780 нм [11]. Спектры регистрировали в растворах толуола с шагом 1 нм.

Элементный состав асфальтенов определен по данным рентгенфлуоресцентного анализа на аппарате Спектроскан Макс G.

Необходимо отметить, что, поскольку асфальтены являются многокомпонентными системами, речь идет о среднечисловом значении молекулярной массы и соответствующих ему термодинамических характеристиках. Среднечисловая молекулярная масса образцов асфальтенов определена методом криоскопии в расплаве нафталина.

Структурно-групповой анализ асфальтенов проведен на аппарате Shimadzu IRAffinity-1S.

По современным данным, молекулы асфальтенов имеют структуры типа «архипелаг» и «континент». В структурах типа «архипелаг» нафтенароматические фрагменты из 3–4 колец разделены между собой алкильными цепочками. В структурах типа «континент» содержится несколько периконденсированных нафтенароматических колец с углеводородными и гетероатомными заместителями. Поскольку максимальными донорно-акцепторными свойствами обладают периконденсированные структуры асфальтенов «континентального» типа, то структуры типа «архипелаг» не рассматривались, так как они не обладают высоким сродством к электрону. Модельные фрагменты нефтяных асфальтенов составлены на основе результатов экспериментов, обобщения сведений по ИК, ЯМР и ЭПР-спектроскопии, а также элементному составу [12–15]. Расчет энергии ионизации и сродства к электрону модельных фрагментов асфальтенов выполнен методом DFT 6-31G* [16].

Результаты и обсуждение

Методом феноменологической электронной спектроскопии получены следующие значения параметров исследованных образцов западно-сибирской нефти: средняя интегральная сила осциллятора — 2 115, средняя энергия ионизации — 5,69 эВ, среднее сродство к электрону — 1,79 эВ.

По данным рентгенофлуоресцентного анализа получен элементный состав асфальтенов: С — 83,58 %, Н — 8,14 %, О — 3,03 %, N — 1,42 %, S — 3,83 %. Отношение С/Н равно 10,27. Среднечисловая молекулярная масса асфальтенов, определенная методом криоскопии, имеет значение 1 078 а. е. м.

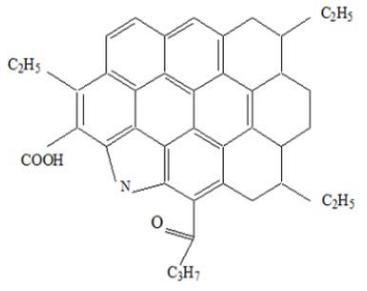
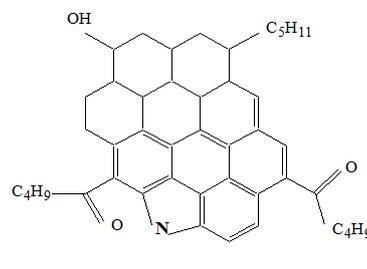
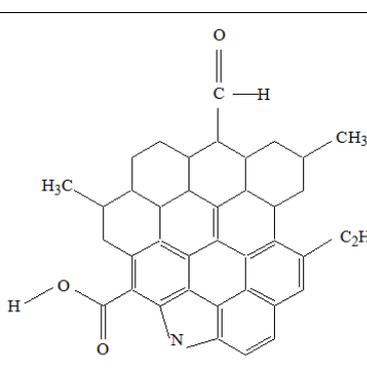
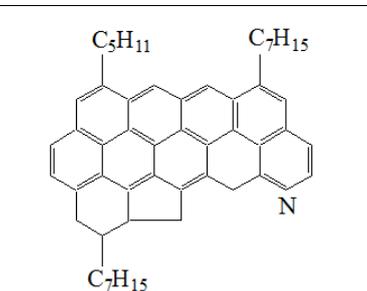
Согласно данным ИК-спектров, в образцах асфальтенов присутствуют валентные колебания в области $1\ 607\ \text{см}^{-1}$, которые характерны для системы конденсированных ароматических колец. Полосы $1\ 365$ и $1\ 380\ \text{см}^{-1}$ характерны для длинно-цепочных алкильных групп. Присутствие полос $1\ 679\ \text{см}^{-1}$ свидетельствует о существовании карбонильных групп. Кроме того, имеются полосы $3\ 408\ \text{см}^{-1}$ и $3\ 203\ \text{см}^{-1}$, характерные для пиррольных и ОН-групп.

На основе экспериментальных данных определена структура и построены модельные фрагменты нефтяных асфальтенов (табл. 1). Количество ароматических колец в модельных структурах изменяется от 4 до 13, нафтеновых — от 0 до 6. В каждой структуре предполагается наличие циклопентановых фрагментов и пиридинового кольца. Кроме того, предполагается существование насыщенных алкильных групп с 2–7 атомами углерода. Молекулярные массы структур находятся в интервале от 569 до 780 а. е. м., отношение $(\text{C}/\text{H})_{\text{масс.}} = 8,45 \div 12,60$.

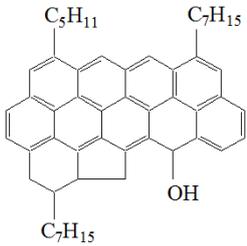
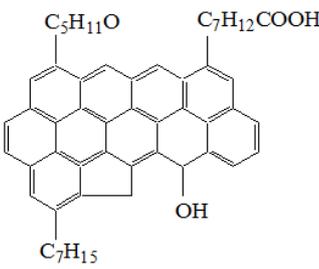
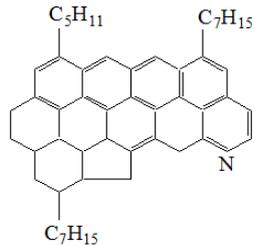
Расчет энергии ионизации и сродства к электрону свободно-радикальных модельных фрагментов асфальтенов выполнен методом DFT 6-31G* [16]. По данным расчетов свободно-радикальные фрагменты асфальтенов обладают энергиями ионизации 4,60–5,27 эВ, а значения сродства к электрону — 2,01–2,30 эВ.

Таблица 1

**Химическая структура свободно-радикальных модельных фрагментов
асфальтенов и их электронные характеристики**

Модельный фрагмент асфальтенов	Молекуляр- ная масса, а. е. м.	C/H	$\frac{n_{sp^2}}{n_{sp^3}}$	Энергия иониза- ции, эВ	Сродство к элек- трону, эВ
	618	12,0 0	1,37	5,27	2,21
	677	10,1 2	0,87	4,87	2,14
	567	12,6	0,46	5,07	2,30
	733	8,93	0,83	4,95	2,05

Продолжение таблицы 1

Модельный фрагмент асфальтенов	Молекулярная масса, а. е. м.	C/H	$\frac{n_{sp^2}}{n_{sp^3}}$	Энергия ионизации, эВ	Сродство к электрону, эВ
	736	9,00	0,83	4,78	2,15
	780	9,28	0,76	4,75	2,08
	737	8,45	0,77	4,60	2,01

Примечание: $\frac{n_{sp^2}}{n_{sp^3}}$ — отношение числа атомов углерода в состоянии sp^2 -гибридизации к числу атомов углерода в sp^3 -гибридизации.

Для дальнейшей проверки гипотезы о взаимосвязи растворимости асфальтенов с их средним сродством к электрону и энергией ионизации растворителей выполнены исследования по оценке растворимости молекулярных фрагментов асфальтенов.

Экспериментально установлено, что растворимость асфальтенов арланской нефти может быть аппроксимирована линейной зависимостью от энергии ионизации органических растворителей (рисунок) [17].

$$C_S = a_1 + b_1 \cdot I_S, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 — коэффициенты.

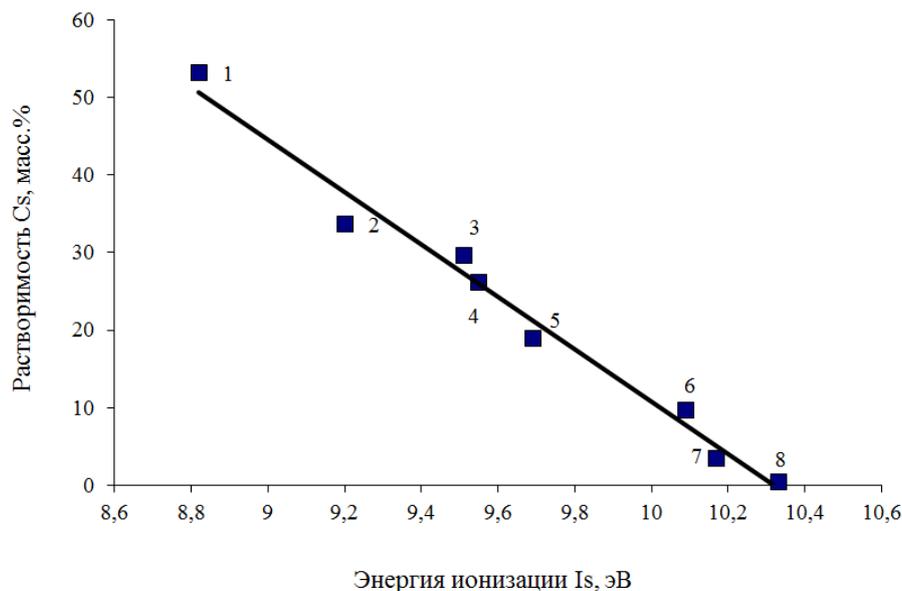


Рисунок. Экспериментальная зависимость растворимости асфальтенов арланской нефти от энергии ионизации органических растворителей [6]:

- 1 — *n*-октен-1 ($I_s = 8,82$ эВ); 2 — диизопропиловый эфир ($I_s = 9,20$ эВ);
 3 — метилэтилкетон ($I_s = 9,51$ эВ); 4 — диэтиловый эфир ($I_s = 9,55$ эВ);
 5 — ацетон ($I_s = 9,69$ эВ); 6 — 2-метилпентан ($I_s = 10,09$ эВ);
 7 — *n*-гексан ($I_s = 10,17$ эВ); 8 — *n*-пентан ($I_s = 10,33$ эВ)

Используя данные растворимости (см. рисунок), получили линейную эмпирическую зависимость

$$C_s = a_2 \cdot \left(\frac{\bar{W}_A - I_s}{RT} \right) + b_2, \quad (2)$$

где коэффициенты $a_2 = 83\,857$ моль⁻¹, $b_2 = 288,94$.

По зависимости (2) оценили растворимость свободно-радикальных модельных фрагментов нефтяных асфальтенов в толуоле, бензоле, ацетоне и *n*-гексане (табл. 2). В качестве экспериментальных значений I_s растворителей использованы данные, полученные методом фотоэлектронной спектроскопии [15]. Согласно расчетам, представленным в таблице 2, растворимость нефтяных асфальтенов выглядит следующим образом (масс. %): в толуоле — от 58,33 до 68,15; в бензоле — от 44,11 до 58,93; в ацетоне — от 28,87 до 38,69; в *n*-гексане — от 12,62 до 22,44.

Результаты расчетов показали, что растворимость образцов асфальтенов западносибирской нефти в толуоле равна 50,88; в бензоле — 36,66; в ацетоне — 21,42; в *n*-гексане — 5,17 (масс %).

Оценка растворимости свободно-радикальных фрагментов нефтяных асфальтенов с различной электронной структурой

Эффективное средство к электрону \overline{W}_A , эВ	Растворимость, масс %			
	толуол ($I_S = 8,82$ эВ)	бензол ($I_S = 9,24$ эВ)	ацетон ($I_S = 9,69$ эВ)	н-гексан ($I_S = 10,17$ эВ)
2,21	65,11	50,88	35,65	19,39
2,14	62,74	48,51	33,28	17,02
2,30	68,15	53,93	38,69	22,44
2,05	59,69	45,47	30,23	13,97
2,15	63,08	48,85	33,61	17,36
2,08	60,71	46,48	31,24	14,99
2,01	58,33	44,11	28,87	12,62
1,79	50,88	36,66	21,42	5,17

Результаты расчетов показывают (см. табл. 2), что наибольшее значение растворимости имеют свободно-радикальные фрагменты нефтяных асфальтенов. Причем растворимость снижается с увеличением энергии ионизации растворителя. Так, наибольшее значение получено для толуола, который имеет $I_S = 8,82$ эВ, а наименьшее — у н-гексана, который имеет $I_S = 10,17$ эВ, что полностью соответствует результатам эксперимента (см. рисунок). Данная закономерность выполняется для всех структур асфальтенов, независимо от соотношения бензольных и нафтеновых колец в молекулах.

Выполненные исследования помогут промышленным специалистам и инженерам сервисных компаний в научно обоснованном подборе растворителя в зависимости от типа отложений тяжелых компонентов нефти. В последние годы в целях снижения себестоимости наметилась тенденция использовать доступные дешевые растворители, такие как газовый бензин, нестабильный конденсат. И если для отложений парафинового типа такой подход вполне оправдан, то в случае асфальто-смолистых отложений он бесполезен; более того, при контакте с легкими углеводородами парафинового ряда может произойти деасфальтизация нефти, что либо ускорит процесс отложений асфальто-смолистых веществ, либо приведет к нарушению штатного режима подготовки нефти, так как диспергированные асфальтены укрепят бронирующие оболочки глобул воды в обратных нефтяных эмульсиях. Чтобы избежать такого негативного сценария, в доступные

растворители следует добавлять ароматические фракции переработки нефти, что снимет риски и увеличит эффективность удаления АСПО.

Выводы

Оценка растворимости модельных фрагментов асфальтенов, полученная с помощью расчетных и экспериментальных методов, показывает, что максимальной растворимостью обладают свободно-радикальные фрагменты асфальтенов с высоким эффективным сродством к электрону. Незначительное изменение сродства к электрону для свободно-радикальных фрагментов на 0,29 эВ вызывает существенный рост растворимости в толуоле — 9,82 %. Для неполярных растворителей изменение сродства к электрону на растворимости существенно не сказывается.

Наибольшую растворяющую способность имеют растворители с низкой энергией ионизации, что подтверждает термодинамику растворимости через образование донорно-акцепторных комплексов.

Список источников

1. Ибрагимов, Г. З. Применение химических реагентов для интенсификации добычи нефти : справочник / Г. З. Ибрагимов, К. С. Фазлутдинов, Н. И. Хисамутдинов. – Москва : Недра, 1991. – 384 с. – Текст : непосредственный.
2. Опыт восстановления и регулирования производительности добывающих и нагнетательных скважин / Г. З. Ибрагимов, Н. И. Хисамутдинов, Н. И. Кобяков [и др.]. – Текст : непосредственный // Обзорная информация. Серия : Техника и технология добычи нефти и обустройство нефтяных месторождений. – Вып. 1. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1990. – 50 с.
3. Разработка комплексной технологии применения композиционного растворителя / В. И. Дарищев, С. А. Харланов, А. А. Халиулов [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 5 (270). – С. 56–59.
4. Иванова, И. К. Физико-химические подходы к выбору эффективных растворителей асфальтосмолопарафиновых отложений : специальность 02.00.13 «Нефтехимия» : диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук / Иванова Изабелла Карловна ; Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук. – Якутск, 2019. – 266 с. – Текст : непосредственный.
5. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер ; под редакцией А. А. Аскадского. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Научный мир, 2007. – 573 с. – Текст : непосредственный.
6. К вопросу о донорно-акцепторных взаимодействиях при растворении асфальтенов / Д. Ф. Варфоломеев, М. Ю. Доломатов, И. Р. Хайрудинов, Ф. Г. Унгер. – Текст : непосредственный // Достижения в исследовании высокомолекулярных соединений нефти : тезисы докладов Всесоюзн. совещ. Томск, 1985. – С. 11.
7. Патент SU 1404936 A1 Российская Федерация, МПИ G01N31/02. Способ определения потенциала ионизации молекул органических соединений : № 4120231/23-04 : заявл. 16.09.1986 : опубл. 23.06.1988. Бюл. № 23 / Доломатов М. Ю., Хайрудинов И. Р., Унгер Ф. Г. – Текст : непосредственный.

8. Физико-химические основы направленного подбора растворителей асфальтосмолистых веществ : монография / М. Ю. Доломатов, А. Г. Телин, М. Б. Ежов [и др.]. – Москва : ЦНИТЭНЕФТЕХИМ, 1991. – 47 с. – Текст : непосредственный.
9. Хайрудинов, И. Р. Современные процессы сольвентной деасфальтизации нефтяных остатков / И. Р. Хайрудинов, Ф. М. Султанов, Э. Г. Теляшев. – Уфа : ГУП ИНХП РБ, 2011. – 208 с. – (Библиотека нефтепереработчика). – Текст : непосредственный.
10. Доломатов, М. Ю. Донорно-акцепторные свойства и растворимость асфальтосмолистых веществ / М. Ю. Доломатов, А. Б. Касьянова, М. К. Рогачев. – Текст : непосредственный // Башкирский химический журнал. – 2001. – Т. 8, № 5. – С. 12–21.
11. Доломатов, М. Ю. Способ определения потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии / М. Ю. Доломатов, Г. Р. Мукаева. – Текст : непосредственный // Журнал прикладной спектроскопии. – 1992. – Т. 56, № 4. – С. 570–574.
12. Состав, свойства, структура и фракции асфальтенов нефтяных дисперсных систем / Г. А. Галимова, Т. Н. Юсупова, Д. А. Ибрагимова, И. Р. Якупов. – Текст : непосредственный // Вестник технологического университета (Казанский национальный исследовательский технологический университет). – 2015. – Т. 18, № 20. – С. 60–64.
13. Доломатов, М. Ю. Структура молекулярных наночастиц нефтяных асфальтенов / М. Ю. Доломатов, С. А. Шуткова, С. В. Дезорцев. – Текст : непосредственный // Журнал структурной химии. – 2012. – Т. 53, № 3. – С. 569–573.
14. Petrophase 2009 panel discussion on standardization of petroleum fractions / D. Merino-Garcia, J. Shaw, H. Carrier [et al.]. – Direct text // Energy & Fuels. – 2010. – Vol. 24, Issue 4. – P. 2175–2177.
15. Энергии разрыва химических связей : потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л. В. Гурвич, Г. В. Карачевцев, В. Н. Кондратьев [и др.] ; под редакцией В. Н. Кондратьева ; Институт химической физики. Институт высоких температур. – Москва : Наука, 1974. – 351 с. – Текст : непосредственный.
16. Шуткова, С. А. Исследование растворимости нефтяных асфальтенов / С. А. Шуткова, М. Ю. Доломатов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий : материалы V Всероссийской научно-практической конференции в рамках Российского энергетического форума и XXVI международной выставки «Энергетика Урала», Уфа, 27–28 октября 2020 г. – Уфа : Башкирский государственный аграрный университет, 2021. – С. 117–123.
17. Доломатов, М. Ю. Способ определения потенциалов ионизации молекул органических соединений. Авторское свидетельство на изобретение SU 1404936 A1, 23.06.88, Бюл. № 23 / М. Ю. Доломатов, И. Р. Хайрудинов, Ф. Г. Унгер. – Текст : непосредственный.

References

1. Ibragimov, G. Z. Fazlutdinov, K. S., & Khisamutdinov, N. I. (1991). *Primenenie khimicheskikh reagentov dlya intensivatsii dobychi nefi: spravochnik*. Moscow, Nedra, Publ., 384 p. (In Russian).

2. Ibragimov, G. Z., Khisamutdinov, N. I., Kobayakov, N. I., Muslimov, R. Kh., Telin, A. G., Kim, M. B., & Khazipov, R. Kh. (1990). Opyt vosstanovleniya i regulirovaniya proizvoditel'nosti dobyvayushchikh i nagnetatel'nykh skvazhin. Obzornaya informatsiya. Seriya: Tekhnika i tekhnologiya dobychi nefi i obustroystvo neftyanykh mestorozhdeniy. Vyp. 1. Moscow, VNIIOENG Publ., 50 p. (In Russian).
3. Darishchev, V. I., Kharlanov, S. A., Khaliulov, A. A., Babinets, Yu. I., Zinoviev, A. V., & Antonova, D. O. (2023). Designing the complex procedure of composite solvent application. *Neft. Gas. Novacii*, (5(270)), pp. 56-59. (In Russian).
4. Ivanova, I. K. (2019). Fiziko-khimicheskie podkhody k vyboru effektivnykh rastvoriteley asfal'tosmoloparafinykh otlozheniy. Diss. ... dokt. khim. nauk. Yakutsk, 266 p. (In Russian).
5. Tager, A. A. (2007). Fiziko-khimiya polimerov. 4th edition, revised and expanded. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 573 p. (In Russian).
6. Varfolomeev, D. F., Dolomatov, M. Yu., Khayrudinov, I. R., & Unger, F. G. (1985). K voprosu o donorno-aktseptornykh vzaimodeystviyakh pri rastvorenii asfal'tenov. Dostizheniya v issledovanii vysokomolekulyarnykh soedineniy nefi: tezisy dokladov Vsesoyuzn. soveshch. Tomsk, pp. 11. (In Russian).
7. Dolomatov, M. Yu., Khayrudinov, I. R., & Unger, F. G. Method of measuring the potentials of ionization of organic compound molecules. Pat. RF SU 1404936 A1. No. 4120231/23-04. Applied: 16.09.86. Published: 23.06.88. Byul. No. 23. (In Russian).
8. Dolomatov, M. Yu., Telin, A. G., Ezhov, M. B., Khisamutdinov, N. I., & Baymukhametov, M. N. (1991). Fiziko-khimicheskie osnovy napravlenogo podbora rastvoriteley asfal'tosmolistykh veshchestv. Moscow, TSNITENEFTEKHIM Publ., 47 p. (In Russian).
9. Khayrudinov, I. R., Sultanov, F. M., & Telyashev, E. G. (2011). Sovremennyye protsessy sol'ventnoy deasfal'tizatsii neftyanykh ostatkov. Ufa, GUP INKHP RB Publ., 208 p. (In Russian).
10. Dolomatov, M. Yu., Kas'yanova, A. B., Rogachev, M. K. (2001). Donorno-aktseptornyye svoystva i rastvorimost' asfal'tosmolistykh veshchestv. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 8(5), pp. 12-21. (In Russian).
11. Dolomatov, M. Yu., & Mukaeva, G. R. (1992). Method for determining the ionization potential and electron affinity of atoms and molecules using electron spectroscopy. *Journal of Applied Spectroscopy*, (56(4)), pp. 344-347. (In English).
12. Galimova, G. A., Yusupova, T. N., Ibragimova, D. A., & Yakupov, I. R. (2015). Composition, properties, structure and fractions of asphaltens of oil dispersion systems. *Herald of technological university*, (18(20)), pp. 60-64. (In Russian).
13. Dolomatov, M. Yu., Shutkova, S. A., & Dezortsev, S. V. (2012). Structure of molecular nanoparticles of petroleum asphaltenes. *Journal of Structural Chemistry*, (53(3)), pp. 563-567. (In Russian).
14. Merino-Garcia, D., Shaw, J., Carrier, H., Yarranton, H., & Goual, L. (2010). Petrophase 2009 panel discussion on standardization of petroleum fractions. *Energy & Fuels*, 24(4), pp. 2175-2177. (In English).
15. Gurvich, L. V., Karachevtsev, G. V., Kondrat'ev, V. N., Lebedev, Yu. A., Medvedev, V. A., Potapov, V. K., & Khodeev, Yu. S. (1974). Energii razryva khimicheskikh svyazey: potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu. Moscow, Nauka Publ., 351p. (In Russian).

16. Shutkova, S. A., & Dolomatov, M. Yu. (2021). Issledovanie rastvorimosti neftyanykh asfal'tenov. Aktual'nye problemy energoobespecheniya predpriyatiy : materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh Rossiyskogo energeticheskogo foruma i XXVI mezhdunarodnoy vystavki "Energetika Urala", Ufa, October, 27-28, 2020. Ufa, Bashkir State Agrarian University Publ., pp. 117-123. (In Russian).

17. Dolomatov, M. Yu., Khayrudinov, I. R., & Unger, F. G. Sposob opredeleniya potentsialov ionizatsii molekul organicheskikh soedineniy. Avtorskoe svidetel'stvo na izobreteniye SU 1404936 A1, 23.06.88, Byul. No. 23. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Шуткова Светлана Александровна, кандидат химических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и физики, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, svetlana-shutkova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8453-1858>

Доломатов Михаил Юрьевич, доктор химических наук, профессор кафедры технологии нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2677-6993>

Телин Алексей Герольдович, кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе, ООО «Уфимский научно-технический центр», г. Уфа, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0822-8515>

Svetlana A. Shutkova, Candidate of Chemistry, Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering and Physics, Bashkir State Agrarian University, svetlana-shutkova@yandex.ru, Ufa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8453-1858>

Mikhail Yu. Dolomatov, Doctor of Chemistry, Professor at the Oil and Gas Department, Ufa State Petroleum Technological University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2677-6993>

Alexey G. Telin, Candidate of Chemistry, Deputy Director for Scientific Work, Ufa Scientific and Technical Center LLC, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0822-8515>

Статья поступила в редакцию 12.12.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2024; принята к публикации 29.03.2024.

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 27.03.2024; accepted for publication 29.03.2024.