

Научная статья
УДК 544.77
doi: 10.17223/24135542/26/1

Метод фотонной корреляционной спектроскопии в исследовании нефтяных дисперсных систем

**Светлана Яковлевна Александрова¹,
Алина Александровна Пичугина², Лариса Васильевна Цыро³,
Феликс Гергардович Унгер⁴**

*^{1,4} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

^{2,3} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ alsya8@ya.r

² pichugina_aa@surgu.ru

³ tsyro_lv@surgu.ru

⁴ felix.unger@yandex.ru

Аннотация. Нефть представляет собой дисперсную систему, и, воздействуя на характер взаимодействия между парафинами, смолами и асфальтенами, становится возможным управлять процессами структурообразования в нефтяной системе. Асфальтены оказывают большое влияние на физико-химические и эксплуатационные свойства нефтей, их изучению уделяется большое внимание, особенно в последнее время в связи с привлечением новых методов исследования. Одним из таких методов является метод фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС). Он позволяет изучать поведение нефтяной дисперсной системы при воздействии на нее растворителей разной природы, температуры. Изучение процессов агрегирования асфальтенов нефти и определение размерных параметров микро- и наноструктур осажденных частиц важны для увеличения эффективности технологий извлечения остаточной нефти.

Получение таких данных открывает перспективы для прогнозирования накопления смолисто-асфальтеновых отложений. Это расширяет возможности предварительной реализации мероприятий по их удалению и уменьшению затрат, связанных с ликвидацией аварий. Практическая ценность знаний об асфальтенах безгранична, так как именно эти компоненты во многом определяют поведение нефтяных систем.

В работе методом фотонной корреляционной спектроскопии изучена склонность образца нефти к осаждению асфальтенов в зависимости от природы растворителя и температуры. На приборе PhotoCorr исследованы разбавленные растворы нефти, в качестве растворителей использовано четыре растворителя марки ХЧ для спектроскопии: четыреххлористый углерод, бензол, хлороформ, н-гексан.

Преимущество метода ФКС состоит в том, что он работает в непрозрачных системах и позволяет определять размер коллоидных частиц без предварительной калибровки спектрометра.

Результаты работы свидетельствуют, что метод ФКС позволяет экспрессно получать данные по динамике изменения параметров в нефтяной системе в процессах растворения и нагревания.

Методом ФКС показано, что во всех исследованных растворителях система проявляет полидисперсность состава по массовым числам.

Ключевые слова: нефтяные дисперсные системы, фотонная корреляционная спектроскопия, асфальтены, агрегирование

Для цитирования: Александрова С.Я., Пичугина А.А., Цыро Л.В., Унгер Ф.Г. Метод фотонной корреляционной спектроскопии в исследовании нефтяных дисперсных систем // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2022. № 26. С. 7–16. doi: 10.17223/24135542/26/1

Original article

doi: 10.17223/24135542/26/1

Method of photon correlation spectroscopy in the study of oil dispersed systems

**Svetlana Ya. Alexandrova¹, Alina A. Pichugina²,
Larisa V. Tsyro³, Felix G. Unger⁴**

^{1, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

^{2, 3} *Surgut State University, Surgut, Russia*

¹ *alsya8@ya.r*

² *pichugina_aa@surgu.ru*

³ *tsyro_lv@surgu.ru*

⁴ *felix.unger@yandex.ru*

Abstract. Oil is a dispersed system, and by influencing the nature of the interaction between paraffins, resins and asphaltenes, it becomes possible to control the processes of structure formation in the oil system. Asphaltenes have a great influence on the physicochemical and operational properties of oils, and much attention has been paid to their study, especially in recent years in connection with the involvement of new research methods. One of such methods is the method of photon correlation spectroscopy (PCS). The method allows studying the behavior of an oil dispersed system under the influence of solvents of different nature and temperature. The study of the processes of aggregation of oil asphaltenes and determination of the dimensional parameters of micro- and nanostructures of deposited particles is important for increasing the efficiency of residual oil recovery technologies.

Obtaining such data provides great opportunities for predicting the accumulation of tar-asphaltene deposits. This expands the possibilities for the preliminary implementation of measures to remove them and reduce the costs associated with the elimination of accidents. The practical value of knowledge about asphaltenes is boundless, since it is these components that largely determine the behavior of oil systems.

In this work, the propensity of an oil sample to asphaltene precipitation was studied by the method of photon correlation spectroscopy, depending on the nature of the solvent and temperature. Dilute oil solutions were studied on the PhotoCor instrument; four solvents of the grade (chemically pure) for spectroscopy were used as solvents: carbon tetrachloride, benzene, chloroform, n-hexane.

The advantage of the PCS method is that it works in opaque systems and allows one to determine the size of colloidal particles without preliminary calibration of the spectrometer.

The results of the work indicate that the FCS method allows you to quickly obtain data on the dynamics of changes in parameters in the oil system during the processes of dissolution and heating.

Using the PCS method, it was shown that in all the studied solvents, the system exhibits a polydispersity of the composition in terms of mass numbers.

Keywords: oil dispersed systems, photon correlation spectroscopy, asphaltenes, aggregation

For citation: Alexandrova, S.Ya., Pichugina, A.A., Tsyro, L.V., Unger, F.G. Method of photon correlation spectroscopy in the study of oil dispersed systems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2021, 26, 7–16. doi: 10.17223/24135542/26/1

Введение

Явление молекулярного рассеяния света, наблюдаемое в жидких средах, описанно М. Смолуховским. Если частота падающего света гораздо больше всех собственных частот среды, молекулярное рассеяние проявляется в оптически однородных средах за счет тепловых флуктуаций плотности, которые включают в себя адиабатические и изобарические флуктуации. Причиной рассеяния света могут быть флуктуации и других термодинамических параметров, таких как концентрация раствора и ориентация молекул. В случае дисперсных систем броуновское движение дисперсных частиц или макромолекул в жидкости приводит к флуктуациям локальной концентрации частиц, результатом чего являются локальные неоднородности показателя преломления и, соответственно, флуктуации интенсивности рассеянного света при прохождении излучения через такую среду. Если молекулы анизотропны, то рассеянный свет будет модулироваться флуктуациями анизотропии. Однако для растворов, содержащих молекулы небольших размеров, анизотропное рассеяние обычно очень мало по сравнению с концентрационным, и его можно не учитывать.

Характер рассеяния в первую очередь зависит от соотношения между длиной волны и размером рассеивающей частицы: если размер частицы во много раз меньше длины волны, для расчетов применима строгая волновая теория рассеяния света. При увеличении размеров частиц до величины, сравнимой с длиной волны, т.е. в переходной области от мелких частиц к крупным, расчет значительно усложняется.

На распределение рассеянного света в значительной мере влияет и форма частиц. Для сферических частиц ориентация их относительно направления падения света при любом состоянии поляризации не играет роли. Рассеяние света частицами любой другой формы зависит от их расположения относительно направления падающего света. Это сильно усложняет расчеты, особенно если частицы имеют несимметричную форму, что часто наблюдается в реальных дисперсных средах [1, 2].

В общем случае молекулярное рассеяние света следует рассматривать как стохастический процесс. Для его полного описания необходимо исследование спектра рассеянного света, которое дает информацию о динамической

структуре жидкости, связанной с трансляционными и ротационными молекулярными движениями или с другими коллективными движениями.

Дисперсные системы являются сложными объектами для исследования и предъявляют особые требования к методам измерения размеров частиц дисперсной фазы. Диапазон размеров частиц, встречающихся в дисперсных средах, может изменяться от малых долей длины волны возбуждающего излучения до величин, бесконечно больших по сравнению с ней, поэтому характеристики частиц и методы исследования для разных объектов будут существенно отличаться. Для анализа таких объектов широкое распространение получили методы, основанные на явлении рассеяния света [3, 4].

Метод исследования

Метод фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС) [5] является наиболее совершенным оптическим методом определения характеристик дисперсных систем: он не оказывает воздействия на исследуемый объект, что позволяет работать с реальными коллоидными системами; не требует специальной подготовки пробы; для измерений достаточно небольшого объема образца (от 1 см³); время измерения относительно мало (от 1 с до нескольких минут); аппаратура позволяет непосредственно определять размеры коллоидных частиц в диапазоне от 1 до 5 000 нм; процесс измерения и обработки результатов полностью автоматизирован.

Фотонная корреляционная спектроскопия позволяет измерять размеры частиц в субмикронном диапазоне и исследовать любые прозрачные и непрозрачные среды. Реализация этого метода стала возможной после изобретения лазера – источника монохроматического света с узкой шириной спектра и высокой интенсивностью излучения. С появлением нового анализирующего устройства – цифрового многоканального коррелятора – эффективность метода существенно повысилась.

Для проведения измерений размера частиц дисперсных систем в работе используется система PhotoCor. Оптическая схема прибора специально усовершенствована для измерения сильнопоглощающих жидкостей, в данной работе это – растворы нефти. PhotoCorComplex собран по традиционной схеме многоцелевого анализатора размеров субмикронных частиц, предназначенного для измерения как динамического, так и статического рассеяния света. На массивном диске смонтированы прецизионный гониометр и оптическая скамья, на которой размещены He–Ne лазер и фокусирующий узел. Термостат и адаптер кювет установлены на гониометре коаксиально с его осью. На поворотной консоли гониометра располагается фотоприемный блок, в состав которого входят высокоэффективная приемная оптика с револьверной диафрагмой выбора апертуры, мал шумящий отобранный фотоумножитель, работающий в режиме счета фотонов, быстрый усилитель-дискриминатор и специальный высоковольтный источник питания ФЭУ без паразитных корреляций. Сигнал с выхода фотоприемного блока анализируется одноплатным многоканальным коррелятором, который вставляется

непосредственно в один из разъемов материнской платы персонального компьютера. С помощью компьютера осуществляются управление процессом измерения и обработка полученных результатов.

Современные технологии основаны на вычислительных процедурах компьютерных программ, это касается и техники для аналитических измерений в химии; они предоставляют полный результат расчета с заложенными программными ограничениями, оставляя исследователям возможность использовать результаты в той мере, которая зависит от предварительной подготовки, знания особенностей образца, интеллекта пользователя.

В результатах ФКС отражена вся процедура обработки экспериментальных данных. Логика их получения состоит в статистическом накоплении в сумматоре компьютера экспериментальных данных и жестко связана с типом, структурой и поведением исследуемого образца. Смысл этого накопления заключается в том, чтобы увеличить отношение полезного сигнала к сигналу шума, при этом сигнал шума уменьшается, а полезный сигнал увеличивается в количество раз, равное корню квадратному из количества накоплений. Поэтому в приборах такого типа ошибка не может быть установлена заранее для универсальной ситуации, а каждый раз вычисляется отдельно и приводится в результатах. Эта ошибка является характеристикой суммы абсолютной погрешности и погрешности всей измерительной и вычислительной системы в целом.

Эксперимент проводился на фотонном корреляционном спектрометре UNICOR-SP в режиме гомодинного детектирования: монохроматическое излучение He–Ne лазера (ЛГ-38; мощность излучения ~ 50 мВт, $\lambda = 655$ нм), проходя через кювету с образцом, рассеивалось частицами дисперсной фазы и фиксировалось фотодетектором, работающим в системе счета фотонов (ФЭУ-136; $f_{\text{max}} = 35$ МГц, уровень шума 10–40 имп/с), сигнал с которого поступал на многоканальный цифровой коррелятор PhotoCor-SP, встроенный в один из разъемов материнской платы компьютера.

Результаты

На приборе PhotoCor были исследованы разбавленные растворы нефти, в качестве растворителей использовано четыре растворителя марки ХЧ для спектроскопии, а именно: четыреххлористый углерод, бензол, хлороформ, н-гексан.

Навеска нефти составляла 5 мг на 10 мл растворителя. Условия эксперимента для каждого из растворителей были внесены в соответствующую таблицу. Эксперименты с изменением температуры проведены в условиях термостатирования измерительной кюветы, обеспеченных конструктивными возможностями прибора.

В случае исследования нефтей и их растворов объекты исследования ведут себя как образцы с яркими гомолитическими свойствами. Небольшие изменения температур и концентраций приводят к очень большому скачку величин размеров частиц благодаря их свойствам.

В табл. 1 представлены условия эксперимента и результаты исследования растворов нефти в четыреххлористом углероде и хлороформе. Учитывая время накопления при 23°C, для четыреххлористого углерода величина частиц в растворе составляет 51 нм, причем наблюдается бимодальное распределение со вторым максимумом в области величины частиц 290 нм. При повышении температуры до 40°C размеры частиц уменьшаются по величине на два порядка и составляют в среднем 0,6 нм. Данные таблицы демонстрируют полидисперсное состояние системы. Для добываемых нефтей полидисперсность является характерной чертой, о чем сообщалось в [6]. В растворе хлороформа при температуре 23°C величина частиц составляет в среднем 102 нм.

Таблица 1

Условия эксперимента и результаты измерения размеров частиц растворов нефти в четыреххлористом углероде в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	Радиус частиц, нм	Время накопления, с	Индекс полидисперсности	$D \cdot 10^8, \text{см}^2/\text{с}$
<i>в четыреххлористом углероде</i>				
23	51	3 592	–	4,56
23	110	14 742	4,5	2,11
23	290	1 800	4,4	0,80
25	105	408	2,6	2,30
40	0,6	2 128	–	517,8
<i>в хлороформе</i>				
23	103	1 403	–	3,94

Для бензольных растворов при температуре 18°C величина частиц в среднем соответствует 30 нм (рис. 1). На одной из экспериментальных кривых явно просматривается второй максимум, который свидетельствует о полифункциональности распределения.

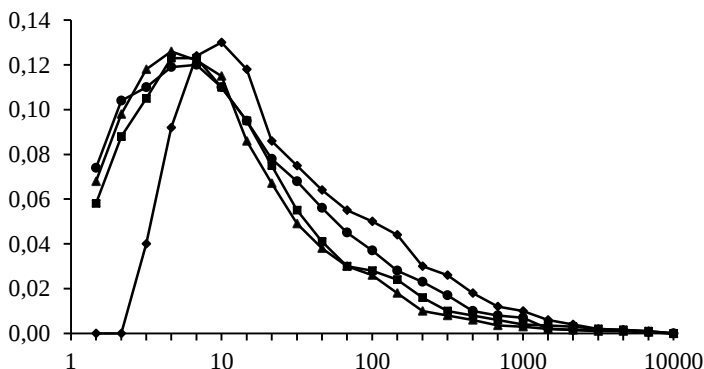


Рис. 1. Массовое распределение частиц нефти в бензоле при температуре 18°C для нескольких параллельных измерений: по оси абсцисс – средний радиус частиц в нм (логарифмическая шкала), по оси ординат – относительная масса всех частиц с заданным значением радиуса

На рис. 2 представлены результаты эксперимента, проведенного во времени таким образом, что раствор нефти был оставлен в условиях термостатирования на 72 ч. Видно, что картина распределения по массам изменилась. Пологие кривые соответствуют крупным частицам с большим радиусом, т.е. даже для абсолютного растворителя, каким для нефтяных дисперсных систем считается бензол, равновесные процессы образования ассоциатов и их распада приводят к отторжению этих частиц из раствора.

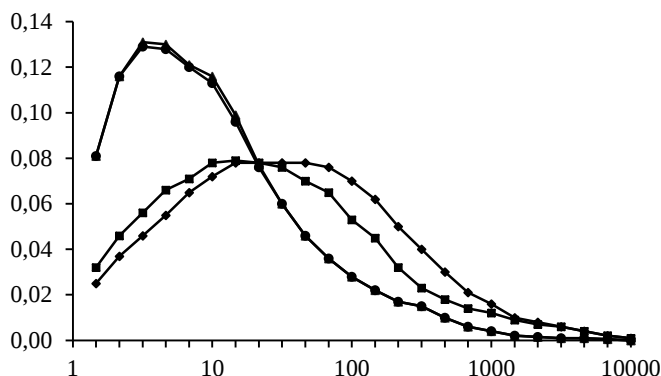


Рис.2. Массовое распределение частиц нефти в бензоле при температуре 18°C для нескольких параллельных измерений; пологие кривые получены через 72 ч: по оси абсцисс – средний радиус частиц в нм (логарифмическая шкала), по оси ординат – относительная масса всех частиц с заданным значением радиуса

Результаты эксперимента по разбавлению нефти растворителем насыщенного ряда в различных соотношениях с нефтью в условиях работы лазера в режиме отражения $90^\circ < \theta < 180^\circ$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры частиц в растворах с разным соотношением нефти и н-гексана в зависимости от температуры

Соотношение н-гексан : нефть	Размеры частиц, нм			
	1:10	1:20	1:30	1:40
$t, ^\circ\text{C}$				
20	161 ± 20	123 ± 18	102 ± 21	68 ± 12
30	–	–	67 ± 14	79 ± 12
40	–	–	34 ± 12	128 ± 23
50	–	–	18 ± 6	132 ± 22

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о зависимости размеров частиц в растворе от количества растворителя и температуры в системе. Соотношение нефти и гексана 1:10 частей по объему приводит к получению результата только при температуре 20°C. Это можно объяснить тем, что, возможно, при повышении температуры произошло слипание и полное осаждение крупных частиц. Аналогичная ситуация наблюдается при соотношении нефти и гексана 1:20.

Соотношение нефти и гексана 1:30. Экспериментально размер частиц определяется при высоких температурах и по сравнению с предыдущими результатами он достаточно мал. Это, вероятно, объясняется тем, что по мере увеличения количества растворителя силы взаимодействия все более приобретают характер отталкивания, крупные частицы оседают, а мелкие присутствуют в растворе.

Для соотношения нефти и гексана 1:40 с увеличением температуры радиус увеличивается. Это объясняется тем, что при больших количествах растворителя и высоких температурах процессы взаимного отталкивания способствуют процессам образования и осаждения крупных частиц.

Метод ФКС позволяет оценивать поведение системы в процессе варьирования соотношения нефть : растворитель, изменения температуры системы. Ограничением является лишь температура кипения растворителя.

Заключение

Приведенные данные по динамике изменения параметров в нефтяной системе в процессах растворения и нагревания говорят о высокой информативности метода фотонной корреляционной спектроскопии для изучения процесса осаждения. Гистограммы распределения по массам при разных температурах свидетельствуют о сложности проходящих процессов.

Для четыреххлористого углерода данные экспериментов в условиях изменения температур полностью соответствуют результатам [7]. Перестройка системы с увеличением размеров частиц с повышением температуры происходит за счет образования дополнительного количества частиц с наличием неспаренного электрона, источником которых выступают молекулы смол, т.е. вещества с переменными спиновыми свойствами [8]. Поскольку образующиеся частицы обладают разным набором квантовых чисел, то, выделяясь в отдельное фазовое пространство, они не имеют никакой другой возможности скомпенсировать возникшие возможности, кроме как объединиться в более крупный ассоциат. Причиной описанных трансформаций исследуемого вещества в растворителе, несомненно, является измененное состояние самого растворителя [9], можно лишь предполагать – какое, весьма вероятно, что это – пространственные перегруппировки.

По данным исследования нефти методом малоуглового рассеяния [10] показано, что размер ядер в исходной нефти составляет 30 и 8 Å. Наличие двух значительно отличающихся размеров означает, что исходная нефть представляет полидисперсную систему, состоящую из первичных сложных структурных единиц (ССЕ) двух размеров. В динамике прослежено слияние вторичных ССЕ, что дает величины 35, 46 Å. Вывод подтверждается исследованиями влияния тепловых, механических, электромагнитных и других воздействий на структуру нефтяных дисперсных систем [11]. Их наших данных следует, что во всех исследованных растворителях система проявляет полидисперсность состава по массовым числам.

Сопоставляя полученные нами результаты с литературными, можно констатировать, что разбавленные растворы всех примененных растворителей содержат частицы, сравнимые по размерам с молекулярными, т.е. ССЕ в них могут быть тождественны второму максимуму в распределениях по массам: 156 нм для бензола, 102 нм для CHCl_3 , 290 нм для CCl_4 .

Проведенные исследования теоретически и практически полностью укладываются в концепцию спиновой природы смол и асфальтенов, наличия процессов гомолитической диссоциации, построения ассоциативных комбинаций в нефтяных дисперсных системах по принципам, развитым в [7, 8].

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Метод ФКС позволяет экспрессно получать данные по динамике изменения параметров в нефтяной системе в процессах растворения и нагревания.

2. Методом ФКС показано, что во всех исследованных растворителях система проявляет полидисперсность состава по массовым числам.

Список источников

1. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М. : Мир, 1986. 664 с.
2. Хюлст Г.Х. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М. : Изд-во иностр. лит., 1961. 536 с.
3. Фабелинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. М. : Наука, 1965. 511 с.
4. Вукс М.Ф. Рассеяние света в газах, жидкостях и растворах. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 320 с.
5. Yudin I.K., Nikolaenko G.L., Kosov V.I., Agayan, A., Anisimov M.A., Sengers J.V. A compact photon-correlation spectrometer for research and education // Int J Thermophys. 1997. Vol. 18. P. 1237–1248.
6. Сюняев З.И., Сюняев Р.З., Сафиева Р.З. Нефтяные дисперсные системы. М. : Химия, 1990. 226 с.
7. Андреева Л.Н., Цыро Л.В., Александрова С.Я., Унгер Ф.Г. Альтернативный взгляд на образование нефтяных асфальтенов и водных «солей жесткости» // Технологии ТЭК. 2005. № 5. С. 98–103.
8. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти: Природа смол и асфальтенов. Новосибирск : Наука, 1995. 192 с.
9. Залукаев, Л.П. Обменные взаимодействия в органической химии. Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1974. 387 с.
10. Петраков А.П. Рентгеновская малоугловая диагностика изменения размера сложных структурных единиц нефтяной дисперсной системы под воздействием миллисекундного лазерного излучения // Журнал технической физики. 2000. № 70 (3). С. 31–33.
11. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М. : Наука, 1986. 278 с.

References

1. Boren, K., Hafmen D. Pogloshchenie i rasseyanie sveta malymi chasticami [Absorption and scattering of light by small particles]. M.: Mir, 1986. 664 p. (in Russian)
2. Hylst, G.H. van de. Rasseyanie sveta malymi chasticami [Light scattering by small particles]. M.: Izd-voinostr. lit., 1961. 536 p. (in Russian)
3. Fabelinskij, I.L. Molekulyarnoe rasseyanie sveta [Molecular light scattering]. M.: Nauka, 1965. 511 p. (in Russian)

4. Vuks, M.F. Rasseyanie sveta v gazah, zhidkostyah i rastvorah [Light scattering in gases, liquids and solutions]. L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1977. 320 p. (in Russian)
5. Yudin, I.K.; Nikolaenko, G.L.; Kosov, V.I.; Agayan, V.A.; Anisimov, M.A.; Sengers, J.V. A compact photon-correlation spectrometer for research and education. *Int J Thermophys.* 1997, 18, 1237–1248. doi: 10.1007/BF02575258
6. Syunyaev, Z.I.; Syunyaev, R.Z.; Safieva, R.Z. Neftnyanye dispersnye sistemy [Oil dispersed systems]. M.: Himiya, 1990; 226 p. (in Russian)
7. Andreeva, L.N.; Tsyro, L.V.; Aleksandrova, S.Y.A.; Unger, F.G. Al'ternativnyj vzglyad na obrazovanie neftnykh asfal'tenov i vodnykh «solejzhestkosti» [An alternative view on the formation of petroleum asphaltenes and water «hardness salts»]. *Tekhnologii TEK.* 2005, 5, 98–103. (in Russian)
8. Unger, F.G.; Andreeva, L.N. Fundamental'nye aspekty himii nefti: Prirodasmol i asfal'tenov [Fundamental aspects of the oil chemistry: Nature of the resins and asphaltenes]. Novosibirsk: Nauka, 1995. 192 p. (in Russian)
9. Zalukaev, L.P. Obmennyye vzaimodejstviya v organicheskoy himii [Exchange interactions in organic chemistry]. Voronezh: Izd-vo Voronezh. un-ta, 1974. 387 p. (in Russian)
10. Petrakov, A.P. Rentgenovskaya malouglovaya diagnostika izmeneniya razmera slozhnykh strukturnykh edinits neftyanoy dispersnoj sistemy pod vozdejstviem millisekundnogo lazernogo izlucheniya [X-ray small-angle diagnostics of changes in the size of complex structural units of an oil dispersed system under the influence of millisecond laser radiation]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2000, 70(3), 31–33. (in Russian)
11. Svergun, D.I., Fejgin, L.A. Rentgenovskoe i nejtronnoe malouglovoe rasseyanie [X-ray and neutron small-angle scattering]. M.: Nauka, 1986. 278 p. (in Russian)

Сведения об авторах:

Александрова Светлана Яковлевна – доцент, канд. хим. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: alsya8@ya.ru

Пичугина Алина Александровна – ассистент, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. E-mail: pichugina_aa@surgu.ru

Цыро Лариса Васильевна – доцент, канд. хим. наук, доцент, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. E-mail: tsyro_lv@surgu.ru

Унгер Феликс Гергардович – д-р хим. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: felix.unger@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Alexandrova Svetlana Y. – Associate Professor, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: alsya8@ya.ru

Pichugina Alina A. – Assistant, Surgut State University, Surgut, Russia. E-mail: pichugina_aa@surgu.ru

Tsyro Larisa Vasilyevna – Associate Professor, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. E-mail: tsyro_lv@surgu.ru

Unger Felix Gergardovich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: felix.unger@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.03.2022; принята к публикации 17.05.2022
The article was submitted 21.03.2022; accepted for publication 17.05.2022