

Химия и технология органических веществ
Chemistry and technology of organic substances

УДК 665.6

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-483-496>

EDN MLHKXX



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние кавитационного воздействия на структурные характеристики асфальтенов нефти

Д.В. Никишин[✉], Б.В. Пешнев, А.И. Николаев

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова),
Москва, 119454 Россия

[✉] Автор для переписки, e-mail: nikishin@mirea.ru

Аннотация

Цели. Рассмотреть влияние гидродинамической кавитации на групповой углеводородный состав прямого мазута и структурные характеристики его асфальтенов.

Методы. Кавитационную обработку мазута проводили в гидродинамическом режиме с использованием аппарата «Донор-2». Переход давления в рабочей части составлял 50 МПа, число циклов обработки варьировали от 1 до 10. В ряде случаев, для интенсификации процесса, мазут компаундировали с низкокипящими углеводородами (пропан-бутановой фракцией, декалином). Определение группового углеводородного состава образца основывалось на различной растворимости углеводородов в полярных и неполярных растворителях, асфальтены исследовались методами дифрактометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии).

Результаты. Показано, что в результате кавитационного воздействия изменяется групповой углеводородный состав образца, в нем снижается содержание смол и асфальтенов, возрастает доля масляной фракции и при этом изменяется ее групповой углеводородный состав. Кроме этого установлено, что при кавитационном воздействии изменяются структурные характеристики асфальтенов: у них снижаются параметры кристаллитов L_a и L_c , характеризующие их размеры в плоскости и по высоте, увеличиваются расстояние между алкильными заместителями и степень ароматичности асфальтенов. Обработка спектров комбинационного рассеяния различными методами показала принципиальную схожесть результатов: увеличение интенсивности воздействия приводило к увеличению структурной разупорядоченности асфальтенов. В случае предварительного компаундингования образца с низкокипящими углеводородами эффект от кавитационной обработки усиливался.

Выводы. Полученные результаты могут свидетельствовать о локализации пузырьков кавитации на границах сложных структурных единиц нефтяной дисперсной системы, сформированных асфальто-смолистыми веществами и дисперсионной средой. В связи с этим, именно смолы и асфальтены подвергаются наибольшему термическому воздействию, возникающему при схлопывании кавитационных пузырьков. Деструкция смол и асфальтенов приводит к уменьшению размеров сложных структурных единиц и, соответственно, снижению вязкости нефтяной дисперсной системы, а масляная фракция при этом обогащается насыщенными углеводородами.

Ключевые слова

гидродинамическая кавитация, нефть и нефтепродукты, прямой мазут, асфальтены, сложная структурная единица, групповой состав, вязкость

Поступила: 09.12.2024
Доработана: 27.01.2025
Принята в печать: 05.09.2025

Для цитирования

Никишин Д.В., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Влияние кавитационного воздействия на структурные характеристики асфальтенов нефти. *Тонкие химические технологии*. 2025;20(5):483–496. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-483-496>

RESEARCH ARTICLE

Effect of cavitation on the structural characteristics of oil asphaltenes

Denis V. Nikishin[✉], Boris V. Peshnev, Alexander I. Nikolaev

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119454
Russia

[✉] Corresponding author, e-mail: nikishin@mirea.ru

Abstract

Objectives. To investigate the influence of hydrodynamic cavitation on the group hydrocarbon composition of straight-run fuel oil and the structural characteristics of its asphaltenes.

Methods. The cavitation treatment of fuel oil was carried out in hydrodynamic mode using a Donor-2 device. The pressure drop in the working part was 50 MPa, while the number of treatment cycles varied from 1 to 10. In some cases, to intensify the process, the fuel oil was compounded with low-boiling hydrocarbons (propane-butane fraction, decalin). The determination of the group hydrocarbon composition of the sample was based on the different solubility of hydrocarbons in polar and nonpolar solvents; asphaltenes were studied by diffractometry and Raman spectroscopy.

Results. It is shown that the group hydrocarbon composition of the sample changes as a result of the cavitation effect: the content of resins and asphaltenes decreases, the amount of the oil fraction increases, and its group hydrocarbon composition is altered. It was found that cavitation exposure also changes the structural characteristics of asphaltenes: they decrease the L_a and L_c crystallite parameters that characterize their dimensions in plane and height, as well as increase the distance between alkyl substituents and the degree of plasticity of asphaltenes. The processing of Raman spectra by various methods demonstrated consistent results: in all cases, an increase in the intensity of exposure led to an increase in the structural disorder of asphaltenes. In the case of preliminary compounding of the sample with low-boiling hydrocarbons, the effect of cavitation was enhanced.

Conclusions. The results obtained may indicate the localization of cavitation bubbles at the boundaries of complex structural units of the dispersed petroleum system formed by asphalt-resinous substances and a dispersion medium. For this reason, it is resins and asphaltenes that are most exposed to the thermal effects that occur when cavitation bubbles collapse. The destruction of resins and asphaltenes leads to a decrease in the size of complex structural units and consequent decrease in the viscosity of the petroleum dispersed system, while the oil fraction is enriched with saturated hydrocarbons.

Keywords

hydrodynamic cavitation, petroleum and petroleum products, straight-run fuel oil, asphaltenes, a complex structural unit, group composition, viscosity

Submitted: 09.12.2024

Revised: 27.01.2025

Accepted: 05.09.2025

For citation

Nikishin D.V., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Effect of cavitation on the structural characteristics of oil asphaltenes. *Tonk. Khim. Tekhnol.* = *Fine Chem. Technol.* 2025;20(5):483–496. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-5-483-496>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетов нефтеперерабатывающей промышленности является увеличение глубины переработки нефти, что достигается повышением эффективности и технологичности переработки поступающего на нефтеперерабатывающие заводы сырья. Поиски решения подобных задач осложняются тенденцией к утяжелению добываемого нефтяного сырья. Поэтому разработка методов и технологий, направленных на увеличение выхода светлых нефтепродуктов, является одной из наиболее значимых и актуальных задач.

В литературе рассматривается несколько вариантов повышения глубины переработки нефти за счет физического воздействия: с помощью ультразвуковой, гидродинамической, магнитной, электрогидравлической и других видов обработки [1–5]. С каждым годом интерес к применению в нефтепереработке таких приемов предварительной обработки только растет, при этом один из наиболее эффективных способов обработки основан на использовании явления кавитации [2].

Кавитационная обработка заключается в создании условий, при которых происходит возникновение зародышей пузырьков кавитации, их рост

и последующее схлопывание [6]. Результатом схлопывания одиночного пузырька является возникновение в локальной области экстремальных давлений до 1000 МПа и температур до 5000 К с выделением энергии около $2.5 \cdot 10^{-5}$ Дж [7, 8]. Кавитационная обработка нефтяных дисперсных систем (НДС) может приводить к изменению их свойств и углеводородного состава, что подтверждается экспериментальными работами [9–11]. Однако наблюдаемые изменения, описанные в литературе [10, 12–15], не всегда имеют однозначный характер: например, в работе [13] указывается, что кавитационное воздействие приводило к снижению плотности сырья, а в работе [12] — к ее увеличению. Вязкость НДС после такой обработки снижается [3, 5, 9, 16, 17], но потом, с течением времени, возвращается к значениям, близким к исходным, однако не достигает их [16, 17]. Такой характер изменения вязкости может свидетельствовать о разрушении структуры НДС в результате деструкции межмолекулярных взаимодействий (2–10 кДж/моль), ван-дер-ваальсовых (10–20 кДж/моль) и водородных (20–160 кДж/моль) связей, которыми обладают наименее устойчивые и наиболее высокомолекулярные компоненты нефтяной системы — асфальтены и смолы, формирующие надмолекулярные образования — сложные структурные единицы (ССЕ) [18, 19].

ССЕ представляет собой ядро, состоящее из асфальтенов и смол, окруженное сольватной оболочкой из соединений, молекулярная масса которых убывает от центра к периферии и формирует дисперсную фазу системы, обладающую границей раздела с дисперсионной средой. Наличие в нефти и нефтепродуктах смол и асфальтенов — важный фактор, который необходимо учитывать в процессах добычи, транспортировки и переработки. На стадии добычи из них формируются асфальтосмолопарафиновые отложения в коллекторах и трубопроводах, снижая пропускную способность последних. Повышенная вязкость НДС, смолы и асфальтены увеличивают затраты на транспортировку нефти, в их присутствии возрастают коксообразование в процессах высокотемпературной переработки.

В работах [20, 21] указывается, что наличие границы раздела фаз благоприятствует образованию зародышей пузырьков кавитации. В случае НДС такая граница формируется между дисперсной фазой, образованной смолами и асфальтенами, и дисперсионной средой. Можно допустить локализацию пузырьков кавитации именно на этой границе. Поэтому в результате схлопывания пузырьков наибольшему

термическому воздействию должны подвергаться углеводороды, формирующие границу раздела фаз, в том числе и смолы с асфальтенами.

В настоящей работе рассмотрены структурные изменения асфальтенов мазута под воздействием гидродинамической кавитации. Образцы исследовали методами спектроскопии комбинированного рассеяния (КР) (рамановской спектроскопии) и порошковой дифрактометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования — образец прямого мазута, полученный на установке ЭЛОУ-АВТ-6 завода АО «Газпромнефть-МНПЗ» (Москва, Россия). Кавитационную обработку мазута проводили в гидродинамическом режиме на аппарате «Донор-2» (Экспериментальный завод научного приборостроения Российской академии наук, Россия) [16] при температуре 50°C. Перепад давления в рабочей части устройства составлял 50 МПа, количество циклов обработки варьировали от 1 до 10. В ряде публикаций для повышения эффективности кавитационной обработки предлагается введение в обрабатываемую систему газообразных или жидких компонентов [18, 22–25]. В работе в качестве таких интенсифицирующих компонентов использовали пропан-бутановую фракцию (ПБФ) следующего состава (в об. %): $C_2H_6 \sim 15$, $C_3H_8 \sim 65$, $C_4H_{10} \sim 20$, и декалинсодержащую добавку (в дальнейшем по тексту — декалин) состава (в мас. %): декагидронапталин ($C_{10}H_{18}$) ~ 83.0, бициклопентил ($C_{10}H_{18}$) ~ 5.5, бицикло[5.3.0]декан ($C_{10}H_{18}$) ~ 5.2. Идентификацию проводили с помощью хромато-масс-спектрометрического анализа. ПБФ вводили барботажем газа через слой образца с расходом газа 75 и 225 см³/мин в течение 30 мин непосредственно перед обработкой.

Вязкость определяли на вискозиметрах типа ВНЖ (вискозиметр для непрозрачных жидкостей) (ООО «ЭКРОСХИМ», Россия) по ГОСТ 33-2016¹. Групповой состав образцов определяли методом, описанным в работе [26]. При осаждении асфальтенов массовое отношение навески образца к растворителю брали равным 1 : 40. Асфальтены осаждали в течение 24 ч. Полученный раствор фильтровали с использованием бумажного обеззоленного фильтра марки «Синяя лента» (ООО «Мелиор XXI», Россия). Выделенные асфальтены отмывали от соосажденных парафинов и смол в аппарате Сокслета в течение 2 ч петролейным эфиром 40–70 (ч., АО «ЭКОС-1»,

¹ ГОСТ 33-2016. Межгосударственный стандарт. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. М.: Стандартинформ; 2017. [GOST 33-2016. Interstate Standard. Petroleum and petroleum products. Transparent and opaque liquids. Determination of kinematic and dynamic viscosity. Moscow: Standartinform; 2017.]

Россия) и сушили в лабораторном вакуумном шкафу в течение 1 ч. В качестве адсорбента в колонке использовали силикагель марки АСКГ² (ООО «ХромЛаб», Россия) фракции 0.25–0.50 мм. В качестве растворителей использовали петролейный эфир, толуол (х.ч., АО «База №1 Химреактивов», Россия) и изопропиловый спирт (х.ч., АО «База №1 Химреактивов», Россия). Для осаждения и отмычки асфальтенов, а также для выделения насыщенных углеводородов, применяли петролейный эфир, для выделения ароматических углеводородов — толуол, для выделения смол — смесь толуола и изопропилового спирта в соотношении 30 к 70. Объемное соотношение силикагель/образец составляло 100 : 1.

Выделенные из образцов мазута асфальтены исследовали методами порошковой дифрактометрии и спектроскопии КР. В работе используется следующая нумерация образцов: 1 — асфальтены, выделенные из исходного мазута; 2 — асфальтены, выделенные из мазута после кавитационной обработки; 3 — асфальтены, выделенные из мазута после обработки, непосредственно перед воздействием через мазут продували ПБФ с расходом 225 см³/мин; 4 — асфальтены, выделенные из компаунда мазута с декалином (в количестве 2 мас. %) после его обработки. Во всех случаях осуществлялось пять циклов воздействия.

Съемку дифрактограмм выделенных асфальтенов проводили при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре XRD 6000 (CuK_α-излучение, длина волны $\lambda = 0.1542$ нм, *Shimadzu Corporation*, Япония) при углах $2\theta = 10^\circ$ – 80° . Скорость поворота гониометра составляла 0.02°/с. Полученные дифрактограммы обрабатывали в программе Origin. Для разделения полученных пиков использовали функции Гаусса.

Спектры КР асфальтенов получали при комнатной температуре на конфокальном рамановском микроскопе Confotec Uno (*SOL Instruments*[®], Белоруссия) в диапазоне сдвигов от 400 до 4000 см^{−1}. Длина волны излучения составляла 532 нм. Мощность излучения составляла 10% от максимально возможного значения (50 мВт). Время испытания — 50 с. Полученные спектры обрабатывали в программе Origin. Для разделения полученных спектров на пики D1–D4 и G применяли функции Гаусса, Лоренца и Фойгта (методика 1) [27]. Разделение полученных спектров на составляющие их пики также проводили по методике, описанной в работе [28], где пик G (приблизительное положение максимума ~ 1580 см^{−1}) отвечает за наличие идеальной графитовой структуры (отклик формируется колебаниями

атомов углерода с sp²-гибридизацией, формирующими плоскости конденсированных ароматических слоев), D (~ 1350 – 1370 см^{−1}) — за дефекты в решетке идеальной графитовой структуры и ее краев (методика 2). В работах [28–30] раскрывается отнесение пиков SL (~ 1230 см^{−1}), VR (~ 1380 см^{−1}), VL (~ 1460 см^{−1}), GR (~ 1540 см^{−1}), G2 (~ 1600 см^{−1}) к различным структурным фрагментам, но достоверно интерпретировать возможно лишь соотношение интегральных интенсивностей пиков D и G.

Структурные параметры асфальтенов определяли по результатам рентгеноструктурного анализа с применением формул (1)–(8) [31, 32].

Расстояние между ароматическими слоями d_m рассчитывали по формуле Брэгга–Вульфа (1):

$$d_m = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{002}}, \quad (1)$$

где λ — длина волны рентгеновского излучения, Å; θ_{002} — угол, соответствующий максимуму 002-полосы, градусы.

Расстояния между алифатическими цепями или циклами d_γ рассчитывали по формуле (2):

$$d_\gamma = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_\gamma}. \quad (2)$$

Средний диаметр ароматических слоев L_a рассчитывали по формуле (3):

$$L_a = \frac{0.92}{FWHM_{10}}, \quad (3)$$

где $FWHM_{10}$ (full width at half maximum) — полная ширина гало 10 на полувысоте ее максимума, измеренная в единицах $(\sin \theta)/\lambda$, градусы.

Среднюю высоту пачки (crystallite size) ароматических слоев L_c рассчитывали по формуле (4):

$$L_c = \frac{0.45}{FWHM_{002}}, \quad (4)$$

где $FWHM_{002}$ — полная ширина гало 002 на полувысоте ее максимума, измеренная в единицах $(\sin \theta)/\lambda$, градусы.

Среднее число атомов углерода (atomic units) в ароматическом слое C_{au} оценивали по формуле (5):

$$C_{au} = \frac{L_a + 1.23}{0.65}. \quad (5)$$

Среднее число ароматических колец NO_a в слое оценивали по формуле (6):

$$NO_a = \frac{L_a}{2.667}. \quad (6)$$

² Активированный силикагель крупнопористый гранулированный. / Activated silica gel, coarse-pored, granulated.

Среднее число ароматических слоев в пачке M оценивали по формуле (7):

$$M = \frac{L_c}{d_m} + 1. \quad (7)$$

Степень ароматичности асфальтенов f_a определяли по формуле (8):

$$f_a = \frac{A_{002}}{A_{002} + A_\gamma}, \quad (8)$$

где A_{002} и A_γ — площади пиков 002 и γ -полос.

По результатам обработки спектров КР асфальтенов рассчитывали параметры R_1 и R_2 по формулам (9) и (10) [33] для оценки разупорядоченности их структуры:

$$R_1 = \frac{I_{D1}}{I_G}, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{I_{D1}}{I_G + I_{D1}}, \quad (10)$$

где I_{D1} и I_G — площади (интегральные интенсивности) пиков D1 и G.

Оценку диаметра ароматического слоя по результатам спектроскопии КР L_a^{KP} (нм) проводили по формуле (11) [27, 34]:

$$L_a^{KP} = 4.4 \frac{A_G}{A_{D1}}. \quad (11)$$

Среднее число ароматических колец в слое NO_a по результатам спектроскопии КР оценивали по формуле (12) [27]:

$$NO_a = \frac{L_a^{KP} \cdot 10}{2.667}. \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены результаты, подтверждающие информацию о снижении вязкости НДС в результате кавитационного воздействия. При этом установлено существенное влияние количества циклов обработки на реологические характеристики системы. Последующее возрастание вязкости также согласуется с ранее полученными результатами. Как уже указывалось, снижение вязкости нефтепродуктов в результате кавитационной обработки связывают с деструкцией слабых межмолекулярных связей ССЕ. С течением времени эти связи восстанавливаются, размеры ССЕ увеличиваются, что и приводит к возрастанию вязкости. Более важно то, что вязкость не возвращается к исходным значениям, что можно рассматривать как свидетельство о более глубоких изменениях в ССЕ в результате

кавитационного воздействия, в том числе и о внутримолекулярных преобразованиях смол и асфальтенов.

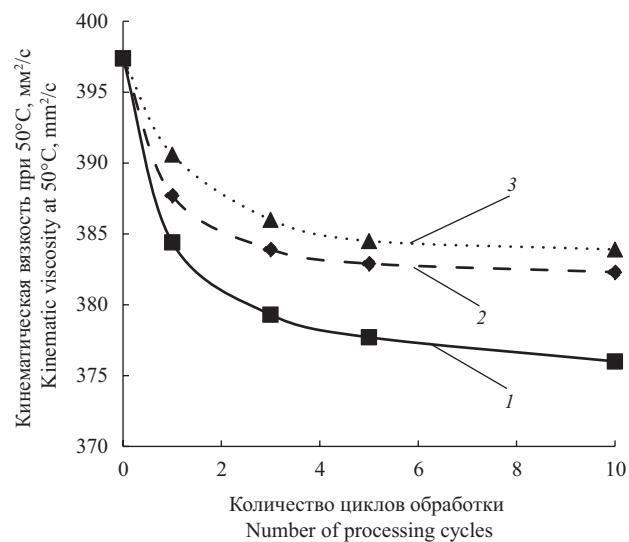


Рис. 1. Влияние условий гидродинамической обработки на вязкость прямого газонаправленного мазута: (1) сразу после обработки; (2) спустя 5 дней; (3) спустя 20 дней

Fig. 1. Effect of hydrodynamic treatment conditions on the viscosity of straight run fuel oil: (1) immediately after treatment; (2) after 5 days; (3) after 20 days

Это подтверждается изменением группового состава мазута (табл. 1). Видно, что после кавитационной обработки в образце снизилось содержание асфальтенов и смол и возросло количество масляных фракций. Интенсификация процесса кавитации путем насыщения сырья перед обработкой ПБФ или добавления декалина увеличивает эффект. При этом он тем больше, чем большее количество ПБФ введено в систему. Отмечено изменение состава масляных фракций, т.е. соотношения содержания насыщенных и ароматических углеводородов. После кавитационной обработки в присутствии инициирующего агента (ПБФ или декалина) в масляной фракции возрастало содержание насыщенных структур и снижалась концентрация аренов. Это не может быть объяснено внесением в образец насыщенных углеводородов (декалина), т.к. после предварительного насыщения мазута ПБФ доля аренов в масляной фракции уменьшилась до 34.7–35.0 мас. %. Такое изменение углеводородного состава объекта исследования может быть объяснено деструкцией смол и асфальтенов при обработке. Например, отщеплением от полициклического ядра алкильных заместителей. Один из возможных механизмов преобразования в цепи асфальтены — смолы — масла рассматривается в работе [35]. Возможно, именно с деструкцией молекул, составляющих ССЕ, связано то, что после обработки не происходит полной релаксации вязкости мазута до исходных значений.

Таблица 1. Изменение группового состава образца прямого мазута после его кавитационной обработки при различных условиях

Table 1. Change in the group composition of the straight-run fuel oil sample after its cavitation treatment under various conditions

Фракция, мас. % Fraction, wt %	Исходный образец Initial sample	Условия кавитационной обработки* Cavitation treatment conditions*			
		Без добавок Without additives	С добавкой ПБФ, см ³ /мин With propane-butane fraction, mL/min		С добавкой декалина With decalin
			75	225	
Асфальтены Asphaltenes	4.4	3.7	2.1	0.5	1.5
Смолы Resins	13.3	12.0	9.6	7.6	12.0
Масла Oils	82.3	84.3	88.3	91.9	86.5

*Пять циклов воздействия / Five cycles of exposure.

Таблица 2. Изменение структурных характеристик асфальтенов мазута после обработки при различных условиях

Table 2. Changes in the structural characteristics of fuel oil asphaltenes after treatment under various conditions

Образец Sample	d_m , Å	d_γ , Å	L_a , Å	L_c , Å	C_{au}	NO_a	M	f_a
1	3.63	4.87	19.97	14.66	32.61	7.49	5.03	0.38
2	3.64	4.93	21.44	12.92	34.88	8.04	4.55	0.40
3	3.65	4.91	18.91	13.72	30.98	7.09	4.76	0.42
4	3.63	4.88	18.73	13.49	30.71	7.02	4.71	0.44

Для подтверждения предположения о деструкции смол и асфальтенов нефти при кавитационном воздействии выделенные из образцов асфальтены были исследованы методами порошковой дифрактометрии и спектроскопии КР. В табл. 2 приведена информация о структурных характеристиках асфальтенов.

Сопоставляя характеристики асфальтенов, выделенных из исходного образца мазута (образец 1) с характеристиками асфальтенов, выделенных из мазута после его кавитационной обработки (образцы 2–4), можно отметить следующие изменения. В результате обработки снизилась средняя высота пачки ароматических слоев L_c , т.е. размеры асфальтенов (ядра ССЕ) стали меньше, а степень ароматичности f_a асфальтенов возросла, что подтверждает предположение об отщеплении от них алкильных заместителей. Это также согласуется с данными об увеличении параметра d_γ , характеризующего расстояние между алкильными заместителями.

При кавитационной обработке мазута в присутствии добавок (ПБФ, декалин) степень

ароматичности асфальтенов (образцы 3 и 4) возрас-
тала еще больше, а средний диаметр ароматическо-
го слоя L_a при этом уменьшался. Нужно отметить,
что для асфальтенов правильнее говорить не о раз-
мере ароматического слоя, а о размере полицикличес-
кого слоя, сформированного конденсированными
ароматическими и нафтеновыми кольцами. Вероятно, в случае с образцами 3 и 4 происходило не только отщепление алкильных цепочек, но и «раскрытие» граничных насыщенных циклов с последующим отрывом образовавшихся алкильных заместителей, т.е. более глубокая деструкция соединений. Это согласуется с наблюдаемыми из-
менениями группового состава (см. табл. 1). При обработке мазута, компаундированного с ПБФ или декалином, фиксировалось более существенное
увеличение содержания масел по сравнению с об-
работкой без добавок.

Описанные изменения структурных характе-
ристик асфальтенов подтверждаются результатами
спектрометрии КР (рис. 2, табл. 3, табл. 4).

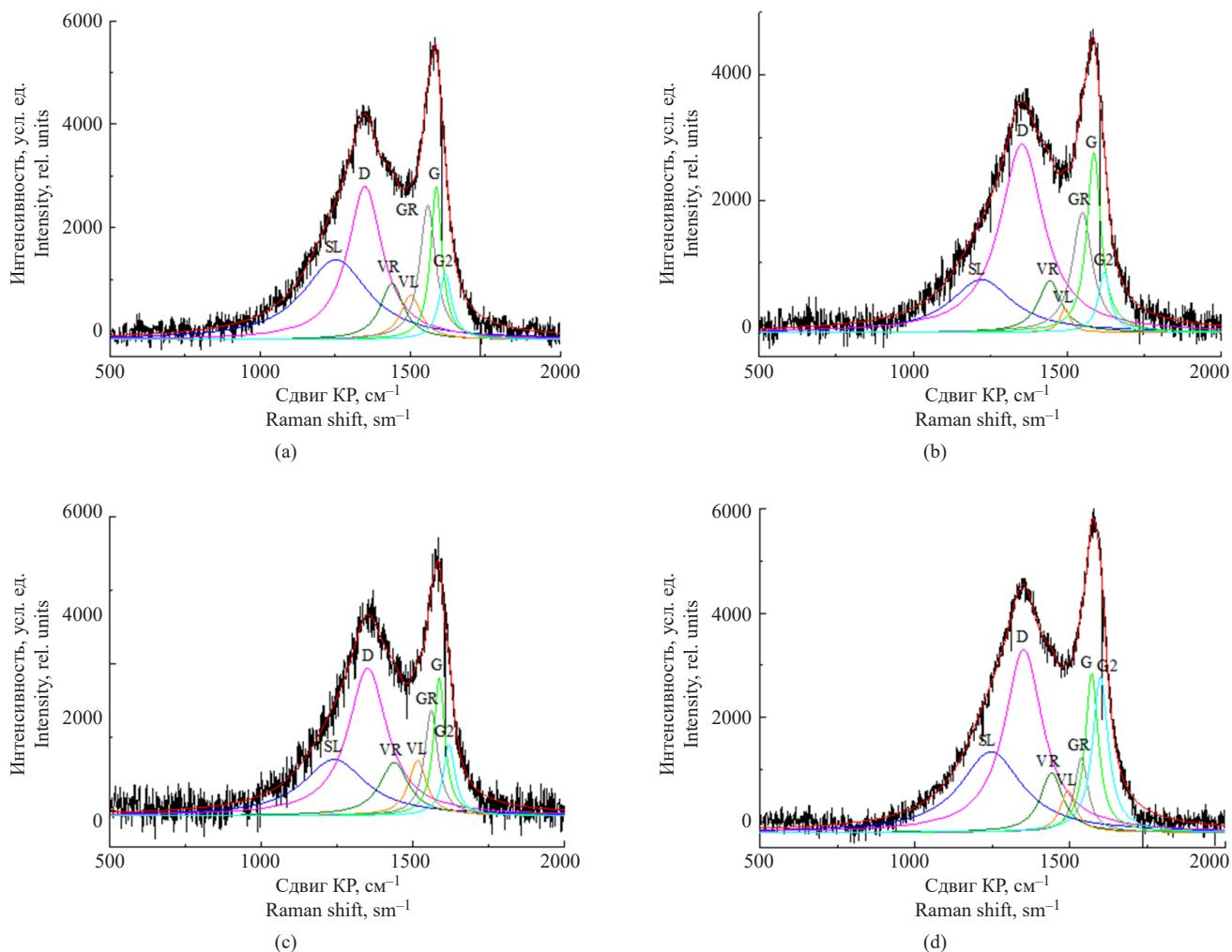


Рис. 2. Спектры КР асфальтенов, обработанные по методике [28]:

(а) образец 1, (б) образец 2, (с) образец 3, (д) образец 4. Чёрная зигзагообразная линия — спектр, полученный экспериментально; соответствующая ей красная гладкая линия — кривая, описывающая спектр; линии остальных цветов — кривые, полученные разложением спектра

Fig. 2. Raman spectra of asphaltenes processed according to the method [28]:

(a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, (d) sample 4. The black line is the spectrum obtained experimentally; the red line is the curve describing the spectrum; the lines of the remaining colors are curves obtained by spectrum decomposition

Таблица 3. Результаты обработки спектров КР различными методиками и функциями

Table 3. Results of processing Raman spectra (RS) by various methods and functions

Образец Sample	R_1	R_2	L_a^{KP} , нм L_a^{RS} , nm	NO_a
Методика 1 [27] Method 1 [27]				
Функция Гаусса Gaussian function				
1	1.52	0.58	2.90	10.86
2	1.83	0.64	2.41	9.03
3	2.75	0.73	1.60	6.00
4	1.75	0.62	2.51	9.42

Таблица 3. Продолжение

Table 3. Continued

Образец Sample	R_1	R_2	L_a^{KP} , нм L_a^{RS} , nm	NO_a
Функция Лоренца Lorentzian function				
1				
1	1.13	0.53	3.89	14.58
2	1.22	0.55	3.62	13.58
3	1.65	0.62	2.66	9.98
4	1.22	0.55	3.60	13.50
Функция Фойгта Voigt function				
1				
1	1.91	0.63	2.30	8.64
2	2.34	0.70	1.88	7.02
3	3.16	0.76	1.39	5.22
4	1.83	0.65	2.40	9.01
Методика 2 [28] Method 2 [28]				
Функция Лоренца Lorentzian function				
1				
1	3.11	0.76	1.42	5.31
2	3.29	0.77	1.34	5.01
3	3.79	0.79	1.16	4.35
4	3.39	0.77	1.30	4.87

Таблица 4. Анализ пиков первого порядка спектров КР асфальтенов с применением различных методик и функций

Table 4. Analysis of the peaks of the first order of the Raman spectra of asphaltenes using various techniques and functions

Образец Sample	Пик Peak	Положение, см^{-1} Position, cm^{-1}	Интенсивность, отн. ед. Intensity, rel. units	Ширина, см^{-1} Width, cm^{-1}	Площадь, отн. ед. Area, rel. units	Доля, % Part, %
Методика 1 [27] Method 1 [27]						
Функция Гаусса Gaussian function						
1	D4	1211	1242	271	357816	21.2
	D1	1362	3394	188	679850	40.5
	D3	1494	1471	99	155556	9.3
	G	1581	4953	85	447654	26.6
	D2	1665	665	57	40016	2.4
2	D4	1152	737	224	175558	12.7
	D1	1363	3225	216	740574	53.8
	D3	1478	492	68	35503	2.6
	G	1576	3761	101	405487	29.5
	D2	1674	372	47	18754	1.4
3	D4	1019	230	37	9116	0.9
	D1	1357	2337	290	722131	72.0
	D3	—	—	—	—	—
	G	1578	2529	98	262872	26.2
	D2	1674	204	42	9047	0.9

Таблица 4. Продолжение

Table 4. Continued

Образец Sample	Пик Peak	Положение, см ⁻¹ Position, cm ⁻¹	Интенсивность, отн. ед. Intensity, rel. units	Ширина, см ⁻¹ Width, cm ⁻¹	Площадь, отн. ед. Area, rel. units	Доля, % Part, %
4	D4	1188	1117	257	305144	17.1
	D1	1360	3914	200	832291	46.7
	D3	1497	1420	94	142759	8.0
	G	1580	5199	86	475110	26.6
	D2	1664	585	44	27671	1.6
Функция Лоренца Lorentzian function						
1	D4	1236	1291	183	342872	18.9
	D1	1348	3213	135	643801	35.4
	D3	1471	1420	125	262639	14.4
	G	1579	4963	76	568910	31.3
	D2	—	—	—	—	—
2	D4	1229	914	200	262821	17.3
	D1	1351	2693	143	568004	37.4
	D3	1461	1107	136	221718	14.6
	G	1579	3951	79	467266	30.7
	D2	—	—	—	—	—
3	D4	1255	757	184	201775	18.0
	D1	1364	2122	161	498641	44.6
	D3	1510	757	103	116392	10.4
	G	1581	2824	71	301695	27.0
	D2	—	—	—	—	—
4	D4	1245	1472	178	379750	19.8
	D1	1353	3485	137	706699	36.8
	D3	1471	1427	121	255871	13.3
	G	1577	5210	74	578393	30.1
	D2	—	—	—	—	—
Функция Фойгта Voigt function						
1	D4	1180	1111	227	339072	19.5
	D1	1355	3663	192	758723	43.6
	D3	1505	1653	111	195718	11.3
	G	1583	4720	79	397212	22.9
	D2	1662	681	66	47894	2.8
2	D4	1153	518	246	138946	9.5
	D1	1363	3241	224	885906	60.6
	D3	1491	611	76	49185	3.4
	G	1581	3805	93	378077	25.9
	D2	1680	220	40	9378	0.6
3	D4	—	—	—	—	—
	D1	1361	2381	293	813860	76.0
	D3	—	—	—	—	—
	G	1580	2555	95	257397	24.0
	D2	—	—	—	—	—
4	D4	1115	597	183	116732	6.3
	D1	1353	4199	248	1109710	59.5
	D3	1496	497	61	32397	1.7
	G	1579	5268	93	605744	32.5
	D2	—	—	—	—	—

Таблица 4. Продолжение

Table 4. Continued

Образец Sample	Пик Peak	Положение, см ⁻¹ Position, cm ⁻¹	Интенсивность, отн. ед. Intensity, rel. units	Ширина, см ⁻¹ Width, cm ⁻¹	Площадь, отн. ед. Area, rel. units	Доля, % Part, %
Методика 2 [28] Method 2 [28]						
Функция Лоренца Lorentzian function						
1	SL	1252	1545	268	649719	28.6
	D	1350	2958	141	653498	30.5
	VR	1439	1089	94	161356	7.7
	VL	1502	864	83	112850	5.4
	GR	1559	2596	64	262344	12.6
	G	1587	2953	45	210196	10.2
	G2	1617	1274	52	104211	5.0
2	SL	1221	843	246	325267	17.0
	D	1352	3007	172	812491	44.0
	VR	1443	824	90	116626	6.5
	VL	1492	381	40	24135	1.4
	GR	1549	1916	78	233752	13.1
	G	1586	2864	55	246851	14.0
	G2	1619	958	47	69986	4.0
3	SL	1240	765	251	301243	21.6
	D	1350	2005	156	491390	36.8
	VR	1437	723	115	131168	10.0
	VL	1515	751	71	84750	6.5
	GR	1559	1433	53	119445	9.3
	G	1586	1872	44	129677	10.2
	G2	1619	970	47	71379	5.6
4	SL	1246	1546	242	588545	24.5
	D	1351	3508	151	830365	36.0
	VR	1441	1143	88	157084	7.0
	VL	1494	804	60	75508	3.4
	GR	1537	1431	53	118196	5.3
	G	1571	3048	51	245220	11.1
	G2	1599	2983	60	283111	12.7

Вне зависимости от методики обработки спектров КР и применяемых функций, для образцов асфальтенов наблюдается общая тенденция: увеличение интенсивности обработки исходного мазута приводит к более выраженному возрастанию разупорядоченности структуры асфальтенов, которая характеризуется параметрами R_1 и R_2 . Увеличение значений параметров R_1 и R_2 , а также интенсивности пика D1 (см. табл. 4) относительно других пиков свидетельствует о внесении дополнительных дефектов в структуру асфальтенов, что подтверждает предположение об их разрушении в процессе кавитационной обработки.

Следует отметить, что при обработке мазута в присутствии декалина заметных изменений

параметров R_1 и R_2 не наблюдалось (образец 4, табл. 3). Вероятно, это может быть связано с тем, что декалин, обладая более высокой температурой кипения по сравнению с ПБФ (на 190–220°C), в условиях кавитационной обработки менее склонен к активному образованию кавитационных зародышей и интенсификации процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты косвенно подтверждают предположение о формировании кавитационных пузырьков на границах раздела фаз, которыми в нефти и тяжелых нефтепродуктах являются ССЕ. В связи с этим деструктивное воздействие обработки,

в первую очередь, направлено на компоненты, формирующие ССЕ. В результате деструкции смол и асфальтенов изменяется групповой состав мазута (снижается доля смол и асфальтенов, асфальтены становятся более ароматизированными, а масляные фракции обогащаются насыщенными углеводородами) и его реологические характеристики, что отражается в снижении вязкости. Уменьшение размеров ядра, формирующего ССЕ, приводит к тому, что даже после релаксации межмолекулярного взаимодействия между ядром и сольватными слоями, вязкостные характеристики системы не возвращаются до исходных значений. Показано, что предварительное компаундирование мазута с низкокипящими углеводородами интенсифицирует процессы деструкции ССЕ при кавитационном воздействии.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2021-689 от 01.09.2021 г. Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры физики и технической механики Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА А.Д. Максимову и Н.А. Санжаровскому за снятие спектров КР предоставленных образцов.

Acknowledgments

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use at the RTU MIREA with the support

of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-15-2021-689 dated September 1, 2021. The authors thank the staff of the Department of Physics and Technical Mechanics of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming at the RTU MIREA, A.D. Maksimov and N.A. Sanzharovskiy, for recording the Raman spectra of the provided samples.

Вклад авторов

Д.В. Никишин — определение объектов исследования, проведение экспериментов, анализ и обработка полученных экспериментальных данных, анализ литературных источников, написание и редактирование текста статьи.

Б.В. Пешнев — формулировка цели и задач исследования, анализ литературных источников, написание и редактирование текста статьи, разработка методологии, анализ полученных результатов.

А.И. Николаев — консультирование по приборной базе, вопросам методологии, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

D.V. Nikishin — identification of research objects, conducting experiments, analysis and processing of experimental data obtained and analysis of literary sources, writing and editing the text of the article.

B.V. Peshnev — formulation of the purpose and objectives of the research, analysis of literary sources, writing and editing the text of the article, development of methodology and analysis of the results obtained.

A.I. Nikolaev — consulting on the instrument base, methodology issues, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пивоварова Н.А. Использование волновых воздействий в переработке углеводородного сырья (обзор). *Нефтехимия*. 2019;59(7):727–738. <https://doi.org/10.1134/S002824211907013X>
- Геллер С.В. Технико-экономическая оценка возможности применения инновационной волновой технологии в нефтепереработке и нефтедобыче. *Нефть. Газ. Новации*. 2010;9:20–26.
- Гафарова Э.Б., Свиридов С.В. Технологии снижения вязкости нефти и нефтепродуктов. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2020;116(2):71–78. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-2\(116\)-71-78](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-2(116)-71-78)
- Нуруллаев В.Х. Условия образования кавитационных зон и их действия на физико-химические характеристики нефтей. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017;1:38–42.
- Сунагатуллин Р.З., Кутуков С.Е., Гольянов А.И., Четверткова О.В., Зверев Ф.С. Управление реологическими характеристиками нефтей физическими методами воздействия. *Нефтяное хозяйство*. 2021;1:92–97. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-1-92-97>

REFERENCES

- Pivovarova N.A. Use of wave effect in processing of the hydrocarbonic raw material (Review). *Pet. Chem.* 2019;59(6): 559–569 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0965544119060148> [Original Russian Text: Pivovarova N.A. Use of wave effect in processing of the hydrocarbonic raw material (Review). *Neftekhimiya*. 2019;59(7):727–738 (in Russ.). [https://doi.org/10.1134/S002824211907013X\]](https://doi.org/10.1134/S002824211907013X)
- Geller S.V. Technical and economic assessment of the possibility of using innovative wave technology in oil refining and oil production. *Neft. Gaz. Novacii = Oil. Gas. Innovations*. 2010;9:20–26 (in Russ.).
- Gafarova E.B., Sviridov S.V. Technologies for reducing viscosity of oil and petroleum products. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2020;116(2):71–78 (in Russ.). [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-2\(116\)-71-78](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2020-2(116)-71-78)
- Nurullaev V.H. Conditions formation of cavitation zones and its action on the physical and chemical characteristics crude oils. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transportation and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2017;1:38–42 (in Russ.).

6. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.12.010>
7. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2011;7:52–58.
8. Аганин А.А., Ганиев О.Р., Давлетшин А.И., Украинский Л.Е. Нагрев жидкости при схлопывании одиночного кавитационного пузырька. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020;1:31–38. <https://doi.org/10.31857/S0235711920010022>
9. Промтов М.А., Сунагатуллин Р.З., Кутуков С.Е., Колиух А.Н., Шеина О.А., Зверев Ф.С., Суховей М.В. Изменение реологических параметров высокопарафинистой нефти при многофакторном воздействии в роторном импульсном аппарате. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020;127(5):76–88. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2020-5-76-88>
10. Торховский В.Н., Антонюк С.Н., Голованов А.Б., Воробьев С.И., Николаева М.В., Дворецков П.А. Переработка компаундированного нефтяного сырья с предварительной активацией исходных сырьевых потоков. Технологии нефти и газа. 2021;133(2):3–7. <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2021-133-2-3-7>
11. Хамидуллин Р.Ф., Харлампи迪 Э., Никulin Р.М., Ситало А.В., Шараф Ф.А. Увеличение выхода светлых дистиллятов при помощи активации нефтяного сырья. Химия и технология топлив и масел. 2016;598:29–34.
12. Промтов М.А. Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти в роторном импульсном аппарате. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018;24(3):455–460. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460>
13. Нуруллаев В.Х., Исмайилов Г.Г. Транспорт нефти с применением кавитационных технологий и определение плотности с учетом обводненности. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2015;1:7–13.
14. Викарчук А.А., Растворова И.И., Чернохаева Е.Ю. Технология и оборудование для обработки нефти и переработки твердых нефешламов и жидких нефтеотходов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012;21:70–75.
15. Торховский В.Н., Антонюк С.Н., Чижевская Е.В., Воробьев С.И., Николаева М.В., Арнацкий В.А. Активация компаундированного нефтяного сырья. Технологии нефти и газа. 2019;123:3–11.
16. Пешнев Б.В., Николаев А.И., Никишин Д.В., Алхамеди М.Х.И. Перспективы использования явления кавитации при переработке нефти. Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология. 2023;66(4):110–116. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236604.6760>
17. Якименко К.Ю., Венгеров А.А., Бранд А.Э. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки. Фундаментальные исследования. 2016;5-3:531–536.
18. Cui J., Zhang Z., Liu X., Liu L., Peng J. Analysis of the viscosity reduction of crude oil with nano-Ni catalyst by acoustic cavitation. Fuel. 2020;275:117976. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117976>
19. Padula L., Balestrin Lia B.S., Rocha N., Carvalho C., Westfahl H., Cardoso M.B., Sabadini E., Loh W. Role of asphaltenes and additives on the viscosity and microscopic structure of heavy crude oils. Energy Fuels. 2016;30(5):3644–3651. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02103>
5. Sunagatullin R.Z., Kutukov S.E., Golyanov A.I., Chetverikova O.V., Zverev F.S. Control of rheological properties by exposure to physical methods. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry J.* 2021;1:92–97 (in Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-1-92-97>
6. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.12.010>
7. Ivanitskiy G.K. Numerical simulation of bubble cloud behavior in hydrodynamic cavitation. Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii = Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies. 2011;7:52–58 (in Russ.).
8. Aganin A.A., Ganiev O.R., Davletshin A.I., et al. Liquid heating during the collapse of a single cavitation bubble. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2020;49(1):24–30. <https://doi.org/10.3103/S1052618820010021> [Original Russian Text: Aganin A.A., Ganiev O.R., Davletshin A.I., Ukrainskyi L.E. Liquid heating during the collapse of a single cavitation bubble. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin.* 2020;49(1):24–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235711920010022>]
9. Promtov M.A., Sunagatullin R.Z., Kutukov S.E., Koliukh A.N., Sheina O.A., Zverev F.S., Sukhovei M.V. Change of rheological parameters of high-paraffin oil under multifactorial impact in a rotor-stator device. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products.* 2020;127(5):76–88 (in Russ.). <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2020-5-76-88>
10. Torkhovsky V.N., Antonyuk S.N., Golovanov A.B., Vorobyov S.I., Nikolaeva M.V., Dvoretkov P.A. Processing of Compounded Oil Feedstock with Pre-Activation of Initial Raw Material Flows. *Tekhnologii nefti i gaza = Oil and Gas Technologies.* 2021;133(2):3–7 (in Russ.). <https://doi.org/10.32935/1815-2600-2021-133-2-3-7>
11. Khamidullin R.F., Kharlampidi K.E., Nikulin R.M., et al. Increasing the Yield of Light Distillates by Activation of Oil Stock. *Chem. Technol. Fuels Oils.* 2017;52(6):670–678. <https://doi.org/10.1007/s10553-017-0759-9> [Original Russian Text: Khamidullin R.F., Kharlampidi K.E., Sitalo A.V., Sharaf F.A., Nikulin R.M. Increasing the Yield of Light Distillates by Activation of Oil Stock. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel.* 2016;598:29–34 (in Russ.).]
12. Promtov M.A. Hydro-Pulse Cavitation Treatment of Crude Oil in the Rotor-Stator Device. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transactions of TSTU.* 2018;24(3):455–460 (in Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460>
13. Nurullaev V.H., Ismayilov G.G. Of quality indicators cargo crude oils with cavitation technologies and gravity determination taking into account the water cut. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transportation and Storage of Oil Products and Hydrocarbons.* 2015;1:7–13 (in Russ.).
14. Vikarchuk A.A., Rastegaeva I.I., Chernyaeva E.Y. Technology and equipment for oil treatment and processing of solid oil sludge and liquid oil waste. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2012;21:70–75 (in Russ.).
15. Torkhovsky V.N., Antonyuk S.N., Chizhevskaya E.V., Vorobyov S.I., Nikolaeva M.V., Arnatsky V.A. Activation of compounded oil feed. *Tekhnologii nefti i gaza = Oil and Gas Technologies.* 2019;123:3–11 (in Russ.).

20. Витенко Т.Н., Гумницкий Я.М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду. *Химия и технология воды*. 2007;29(5):422–432.
21. Капранова А.Б., Лебедев А.Е., Мельцер А.М., Неклюдов С.В., Серов Е.М. О методах моделирования основных стадий развития гидродинамической кавитации. *Фундаментальные исследования*. 2016;3-2:268–273.
22. Lomakin V., Bibik O. Numerical prediction of the gas content effect on the cavitation characteristics of the pump using the simplified Rayleigh–Plesset equation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;492:012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012037>
23. Gonzalez-Estrada O.A., Rojas-Nova M.A., Gonzalez-Silva G. Effect of temperature on a vortex reactor for hydrodynamic cavitation. *Ingeniería e Investigación*. 2022;43(2):e93419. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.93419>
24. Wan C., Wang R., Zhou W., Li L. Experimental study on viscosity reduction of heavy oil by hydrogen donors using a cavitating jet. *RSC Adv.* 2019;9(5):2509–2515. <https://doi.org/10.1039/c8ra08087a>
25. Никишин Д.В., Пешнев Б.В., Николаев А.И., Шебаршинова П.М. Интенсификация процесса кавитационной обработки тяжелого нефтяного сырья. *Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология*. 2024;67(9): 111–117. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246709.7012>
26. Сафина И.Р., Ибрагимова Д.А., Яушев Э.А., Хисмиев Р.Р. Применение метода SARA-анализа для характеристики нефтяных дисперсных систем. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(24):212–213.
27. AlHumaidan F.S., Rana M.S. Determination of asphaltene structural parameters by Raman spectroscopy. *J. Raman Spectrosc.* 2021;52(11):1878–1891. <https://doi.org/10.1002/jrs.6233>
28. Kossovich E., Epshtain S., Krasilova V., Hao J., Minin M. Effects of coals microscale structural features on their mechanical properties, propensity to crushing and fine dust formation. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2023;10(20). <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00578-5>
29. Manoj B. A comprehensive analysis of various structural parameters of Indian coals with the aid of advanced analytical tools. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2016;3(2):123–132. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0134-1>
30. Xu J., Tang H., Su S., Liu J., Xu K., Qian K., Wang Y., Zhou Y., Hu S., Zhang A., Xiang J. A study of the relationships between coal structures and combustion characteristics: The insights from micro-Raman spectroscopy based on 32 kinds of Chinese coals. *Appl. Energy*. 2018;212:46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.094>
31. Антипенко В.Р., Федяева О.Н., Востриков А.А. Параметры макроструктуры наноагрегатов асфальтенов природного асфальтита и продуктов его конверсии в сверхкритической воде. *Нефтехимия*. 2021;61(4):547–554. <https://doi.org/10.31857/S0028242121040109>
32. Антипенко В.Р., Гринько А.А. Параметры макроструктуры нерастворимых продуктов термолиза смол и асфальтенов усинской нефти. *Известия Томского политехнического университета (Известия ТПУ)*. 2021;332(4): 123–131.
33. Филиппов М.М. Рамановская спектроскопия как метод изучения глубоко углефицированного органического вещества. Часть 1. Основные направления использования. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2014;1:115–134.
34. Ok S., Rajasekaran N., Sabti M.A., Joseph G.A. Спектроскопический анализ асфальтенов нефти на молекулярном уровне. *Нефтехимия*. 2020;60(4):520–528. <https://doi.org/10.31857/S0028242120040115>
16. Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Nikishin D.V., Alhamedi M.Kh.I. Prospects of using the cavitation phenomenon in oil refining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khim. tekhnologiya = ChemChemTech*. 2023;66(4):110–116. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236604.6760>
17. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. Technology application of hydrodynamic cavitation treatment of high-viscosity oil processing in order of improving the efficiency of transportation. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2016;5-3:531–536 (in Russ.).
18. Cui J., Zhang Z., Liu X., Liu L., Peng J. Analysis of the viscosity reduction of crude oil with nano-Ni catalyst by acoustic cavitation. *Fuel*. 2020;275:117976. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117976>
19. Padula L., Balestrin Lia B.S., Rocha N., Carvalho C., Westfahl H., Cardoso M.B., Sabadini E., Loh W. Role of asphaltenes and additives on the viscosity and microscopic structure of heavy crude oils. *Energy Fuels*. 2016;30(5): 3644–3651. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02103>
20. Vitenko T.N., Gumnitskii Ya.M. The mechanism of activating action of hydrodynamic cavitation on water. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 2007;29(5):422–432 (in Russ.).
21. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Mel'tser A.M., Neklyudov S.V., Serov E.M. Methods of modeling the developmental stages of hydrodynamic cavitation. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2016;3-2:268–273 (in Russ.).
22. Lomakin V., Bibik O. Numerical prediction of the gas content effect on the cavitation characteristics of the pump using the simplified Rayleigh–Plesset equation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;492:012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012037>
23. Gonzalez-Estrada O.A., Rojas-Nova M.A., Gonzalez-Silva G. Effect of temperature on a vortex reactor for hydrodynamic cavitation. *Ingeniería e Investigación*. 2022;43(2):e93419. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.93419>
24. Wan C., Wang R., Zhou W., Li L. Experimental study on viscosity reduction of heavy oil by hydrogen donors using a cavitating jet. *RSC Adv.* 2019;9(5):2509–2515. <https://doi.org/10.1039/c8ra08087a>
25. Nikishin D.V., Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Shebarshinova P.M. Intensification process of cavitation treatment of the heavy oil feedstock. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khim. tekhnologiya = ChemChemTech*. 2024;67(9):111–117. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246709.7012>
26. Safina I.R., Ibragimova D.A., Yaushev E.A., Khisamiev R.R. Application of the SARA analysis method to characterize oil dispersed systems. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of the Kazan Technological University*. 2014;17(24):212–213 (in Russ.).
27. AlHumaidan F.S., Rana M.S. Determination of asphaltene structural parameters by Raman spectroscopy. *J. Raman Spectrosc.* 2021;52(11):1878–1891. <https://doi.org/10.1002/jrs.6233>
28. Kossovich E., Epshtain S., Krasilova V., Hao J., Minin M. Effects of coals microscale structural features on their mechanical properties, propensity to crushing and fine dust formation. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2023;10(20). <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00578-5>
29. Manoj B. A comprehensive analysis of various structural parameters of Indian coals with the aid of advanced analytical tools. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2016;3(2):123–132. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0134-1>
30. Xu J., Tang H., Su S., Liu J., Xu K., Qian K., Wang Y., Zhou Y., Hu S., Zhang A., Xiang J. A study of the relationships between coal structures and combustion characteristics: The insights from micro-Raman spectroscopy based on 32 kinds of Chinese coals. *Appl. Energy*. 2018;212:46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.094>

35. Sawarkar A., Pandit A., Samant S., Joshi J. Use of ultrasound in petroleum residue upgradation. *Can. J. Chem. Eng.* 2009;87(3):329–342. <http://doi.org/10.1002/cjce.20169>
31. Antipenko V.R., Fedyaeva O.N., Vostrikov A.A. Macrostructural parameters of asphaltene nanoaggregates in natural asphaltite and in its supercritical water conversion products. *Pet. Chem.* 2021;61(7):787–793. <https://doi.org/10.1134/S0965544121070069>
[Original Russian Text: Antipenko V.R., Fedyaeva O.N., Vostrikov A.A. Macrostructural parameters of asphaltene nanoaggregates in natural asphaltite and in its supercritical water conversion products. *Neftekhimiya.* 2021;61(4):547–554 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0028242121040109>]
32. Antipenko V.R., Grinko A.A. Parameters of macrostructure of insoluble products obtained by thermolysis of resins and asphaltenes of the Usinskaya oil. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta (Izvestiya TPU) = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University.* 2021;332(4):123–131 (in Russ.).
33. Filippov M.M. Raman spectroscopy as a method for investigation of highly carbonized organic matter. Part 1. Major applications. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of KarRC RAS.* 2014;1:115–134 (in Russ.).
34. Ok S., Rajasekaran N., Sabti M.A., Joseph G.A. Spectroscopic analysis of crude oil asphaltenes at molecular level. *Pet. Chem.* 2020;60(7):802–809. <https://doi.org/10.1134/S0965544120070117>
[Original Russian Text: Ok S., Rajasekaran N., Sabti M.A., Joseph G.A. Spectroscopic analysis of crude oil asphaltenes at molecular level. *Neftekhimiya.* 2020;60(4):520–528 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0028242120040115>]
35. Sawarkar A., Pandit A., Samant S., Joshi J. Use of ultrasound in petroleum residue upgradation. *Can. J. Chem. Eng.* 2009;87(3):329–342. <http://doi.org/10.1002/cjce.20169>

Об авторах

Никишин Денис Васильевич, ассистент, кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikishin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>

Пешнев Борис Владимирович, д.т.н., профессор кафедры химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: peshnev@mirea.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Николаев Александр Игоревич, д.т.н., профессор кафедры химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

About the Authors

Denis V. Nikishin, Assistant, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: nikishin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>

Boris V. Peshnev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: peshnev@mirea.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Alexander I. Nikolaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>