

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Оригинальная статья

УДК 548.58

EDN: JYQQVC

Измерение температуры выпадения парафинов из нефтегазовых и модельных углеводородных растворов методом рассеяния света

В.А. Дешабо, В.И. Косов, Д.И. Юдин, И.К. Юдин ✉

Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

Аннотация. *Актуальность.* Рассеяние света является чувствительным экспериментальным методом для тестирования коллоидных характеристик в различных системах. В последние годы специальные варианты приборов рассеяния света начинают использоваться для исследования коллоидных фракций нефти, таких как асфальтены, смолы и парафины. *Цель работы.* Прецизионное исследование коллоидных свойств парафинов, входящих в состав различных нефтей и конденсатов, а также некоторых модельных систем парафин – растворитель. *Материалы и методы.* Исследования проводились с помощью оптического анализатора дисперсных свойств углеводородных систем, разработанного в лаборатории фазовых переходов и критических явлений. Были исследованы образцы приобской нефти, конденсаты Уренгойского месторождения и модельные растворы парафинов в октане. *Результаты.* В итоге работы был получен ряд результатов, которые позволяют более точно определять температуру выпадения парафинов из нефтей и конденсатов. При этом для нефти удалось получить характерный многопиковый график, показывающий отдельные компоненты парафинов, присутствующих в нефти. *Заключение.* Проведено прецизионное исследование коллоидных свойств парафинов, входящих в состав различных нефтей и конденсатов, а также некоторых модельных систем парафин – растворитель. Полученные результаты открывают новые перспективы исследования выпадения парафинов из углеводородных систем.

Ключевые слова: парафины, рассеяние света, температурная зависимость, асфальтосмолопарафиновые отложения

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИПНГ РАН (тема № 125020501404-4).

Благодарности: авторы выражают благодарность коллегам Ю.Ф. Кияченко, В.Э. Поднеку и А.Ф. Шарипову (ИПНГ РАН) за полезные обсуждения полученных результатов, за предоставленные для проведения исследований образцы парафинов и пробы природных конденсатов Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения, а также Е.А. Никитиной (ВНИИнефть) за пробы нефти Приобского нефтяного месторождения, использованные для успешной демонстрации работоспособности приборов для анализа содержания парафинов в нефти.

✉ Юдин Игорь Кронидович, yudin@ipng.ru

© Дешабо В.А., Косов В.И., Юдин Д.И., Юдин И.К., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Дешабо В.А., Косов В.И., Юдин Д.И., Юдин И.К. Измерение температуры выпадения парафинов из нефтегазовых и модельных углеводородных растворов методом рассеяния света // Актуальные проблемы нефти и газа. 2026. Т. 17, № 1. С. 21–33. EDN: JYQQBC

Введение

В настоящее время появляется интерес к корректному и точному исследованию процессов выпадения асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в нефтегазовых системах. Отечественными и западными фирмами разработаны и выпускаются приборы для исследования таких систем, включая оптические исследовательские ячейки. Однако для таких ячеек в качестве анализирующих систем предлагаются только видеокамеры для визуального контроля процессов, происходящих в этих ячейках. Этого сегодня недостаточно, поскольку методы статического и динамического рассеяния света уже достаточно широко используются для исследования углеводородных систем. Разработка специального измерительного блока рассеяния света для дополнительной комплектации выпускаемого исследова-

тельного оборудования представляется актуальной задачей.

Целью данной работы является прецизионное исследование коллоидных свойств парафинов, входящих в состав различных нефтей и конденсатов, а также некоторых модельных систем парафин – растворитель.

Материалы и методы

В лаборатории фазовых переходов и критических явлений разработаны методические основы и приборные средства для проведения оптических исследований углеводородного сырья, в том числе и для высокоточных измерений температур выпадения парафинов.

Нами разработан первый вариант измерительного блока [1]. Принципиальная схема блока представлена на рис. 1.

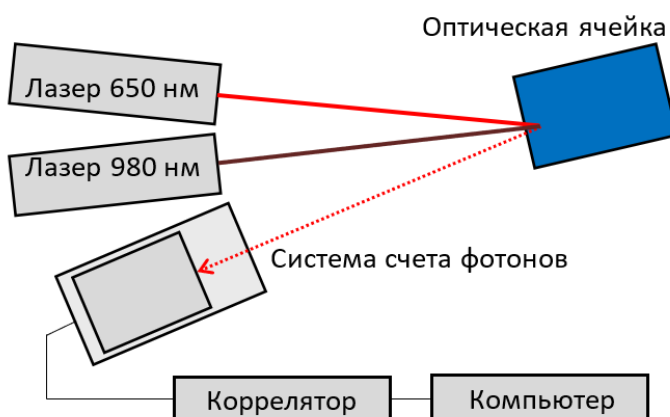


Рис. 1. Принципиальная схема анализатора дисперсных свойств углеводородных систем. Вариант с внешней оптической ячейкой

Fig. 1. Schematic diagram of the analyzer of dispersed properties of hydrocarbon systems. An option with an external optical cell

Лазер 650 нм предназначен для относительно прозрачных систем, а лазер 980 нм – для малопрозрачных систем. Мощность лазеров может варьироваться от 5 мВт до 500 мВт. Система счета фотонов содержит лавинный фотодиод, работающий в одноэлектронном режиме. Коррелятор позволяет измерять корреляционную функцию рассеянного света, что позволяет определить коэффициент диффузии коллоидных частиц и их размер

в диапазоне от долей нанометра до 10 мкм. Компьютер осуществляет все необходимые расчеты и управление работой блока в целом.

Внешний вид прибора Photocor Retotest, рассчитанного в том числе на работу с внешней оптической ячейкой высокого давления, представлен на рис. 2. Этот вариант прибора позволяет значительно расширить его технические возможности.

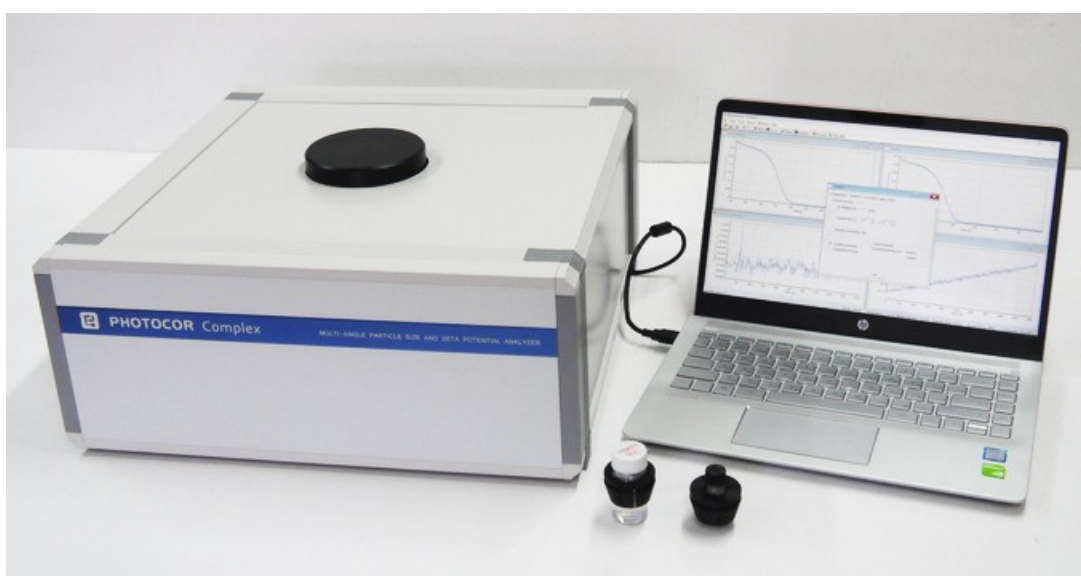


Рис. 2. Внешний вид анализатора дисперсных свойств углеводородных систем

Fig. 2. The appearance of the analyzer of dispersed properties of hydrocarbon systems

В разработанном нами приборе впервые был использован инфракрасный лазер и соответствующая система счета фотонов в качестве фотоприемника [1]. Это позволило проводить исследования в практически непрозрачных для видимого света пробах, например, таких как нефть и растворы асфальтенов. При необходимости возможна разработка вариантов анализатора с инфракрасными лазерами с длиной волны до 1,5 мкм. Универсальный адаптер позволяет проводить

измерения как в обычных негерметичных ячейках, так и в специальных оптических ячейках высокого давления. Подобные ячейки позволяют проводить исследования в особых условиях, например, соответствующих пластовым давлениям и температурам для газовых, конденсатных и нефтяных проб.

Были исследованы образцы приборской нефти, конденсаты Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) и модельные растворы парафинов в октане.

Результаты и обсуждение

Выпадение парафинов из углеводородного сырья

С использованием разработанного прибора динамического рассеяния света были проведены исследования выпадения парафинов в различных углеводородных системах [2–4]. Наиболее интересным и актуальным представлялось исследование выпадения парафинов из природной нефти при уменьшении температуры образца. Поскольку в природной нефти содержится целый ряд парафинов различного молекулярного веса, которые характеризуются отличающимися температурами плавления, авторы данного эксперимента поставили задачу проследить температуру выпадения парафинов. Поскольку метод рассеяния света

характеризуется очень высокой чувствительностью обнаружения различных дисперсных частиц в жидкости, имелись хорошие предпосылки решения такой задачи.

Были проведены исследования рассеяния света ряда проб нефти при уменьшении температуры. Измерения начинались с достаточно высокой температуры, превышающей температуру плавления самого «тяжелого» парафина, присутствующего в данной нефти. Было интересно увидеть, как происходит выпадение парафинов из нефти, т. е. из смеси углеводородных жидкостей, в большинстве которых парафины хорошо растворяются. На рис. 3 представлены два характерных графика двух различных скоростей охлаждения.

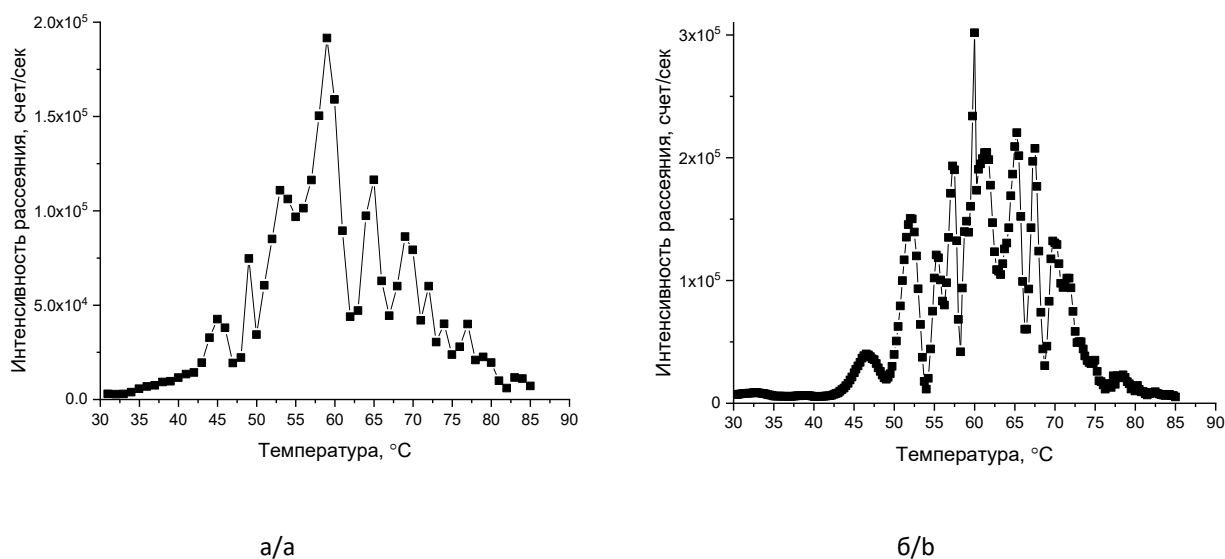


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности обратного рассеяния света для исследования выпадения парафинов из нефти Приобского нефтяного месторождения (образец непрозрачный). Скорость охлаждения: а – 30 °С в час; б – 7,5 °С в час

Fig. 3. Temperature dependence of the backscattering intensity of or studying the precipitation of paraffins from oil of the Priobskoye oil field (the sample is opaque). Cooling rate: a – 30 °C per hour; b – 7.5 °C per hour

Действительно, высокая чувствительность рассеяния света позволяет выделить температуры выпадения парафинов различного молекулярного веса. Более медленная скорость охлаждения позволяет более четко и детально разделять пики кривой выпадения различных парафинов.

Следует отметить хорошую воспроизводимость положения пиков интенсивности рассеяния света в представленных двух измерениях, что подтверждает факт фиксации температур выпадения парафинов различного молекулярного веса. Предварительный анализ имеющихся публикаций показывает, что подобные детальные кривые выпадения парафинов из нефти получены впервые. Возможно, такая методика диагностики поведения парафинов в нефти может дать какие-то существенные практические результаты. Важно отметить, что данные пробы нефти практически непрозрачны, однако геометрия обратного рассеяния позволяет успешно измерять рассеяние света в таких системах.

Конечно, остается вопрос о том, какие именно фракции нефти выпадают

при проведении измерений, использованных в данной работе. Химический анализ выпавших из нефти фракций не проводился вследствие достаточно сложной и неоднозначной процедуры подобных измерений. Однако, все вторичные факторы позволяют говорить о том, что мы наблюдаем именно выпадение парафинов из нефти. В первую очередь, это диапазон температур, хорошо согласующийся с температурами плавления парафинов, а также наблюдаемые эффекты многопикового характера графика выпадения фракции нефти, что соответствует наличию целого ряда парафинов с различными температурами плавления. Другие тяжелые фракции нефти, такие как асфальтены и смолы, не оказывают заметного влияния в наблюдаемые температурные эффекты.

Было также важно исследовать процессы выпадения парафинов в различных модельных системах. Простейшая модель представляет собой раствор высшего алкана (парафина) в низшем алкане, например, октане [5–7]. Результат исследования выпадения парафина $C_{24}H_{50}$ из октана при уменьшении температуры представлен на рис. 4.

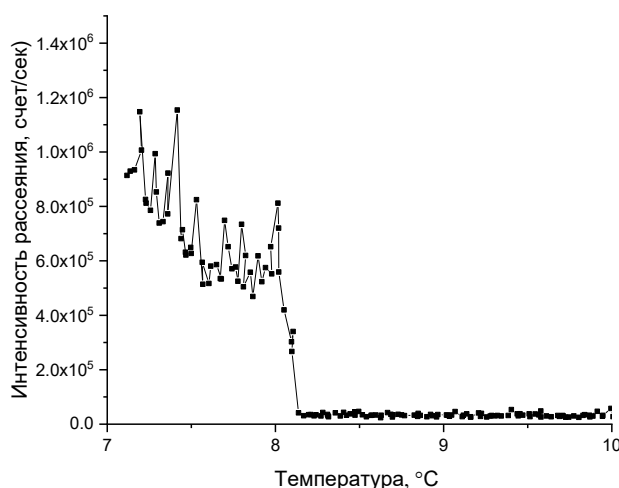


Рис. 4. Температурная зависимость интенсивности рассеяния света при выпадении парафина $C_{24}H_{50}$, растворенного в октане

Fig. 4. Temperature dependence of the light scattering intensity during the precipitation of $C_{24}H_{50}$ paraffin dissolved in octane

Наблюдается четкая температура выпадения индивидуального парафина из индивидуального растворителя. Скорость охлаждения – $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в час. Весовая концентрация парафина в октане 9 вес%. Интересно отметить, что парафин в октане выпадает в виде неплотных хлопьев белого цвета. Этот результат представляет несомненный интерес и требует дальнейшего исследования.

Для подтверждения результатов последовательного выпадения парафинов из нефти при уменьшении температуры пробы нефти были проведены аналогичные измерения для модельного раствора двух парафинов в октане. Концентрация второго добавленного парафина $\text{C}_{28}\text{H}_{58}$ составляла 1,5 вес%. Полученный график представлен на рис. 5.

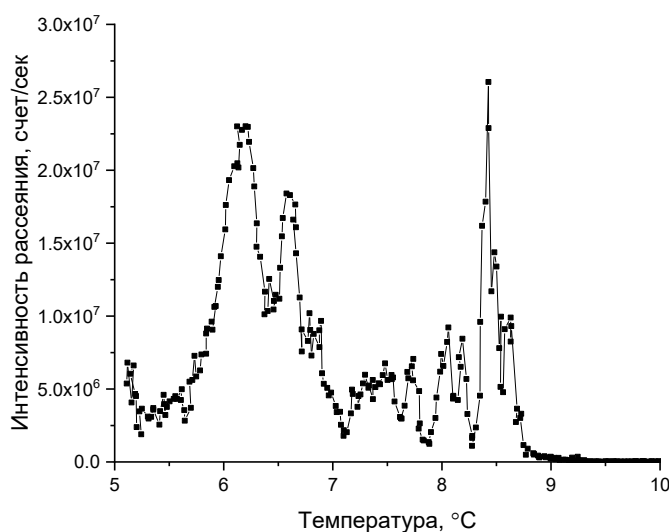


Рис. 5. Температурная зависимость интенсивности рассеяния света при выпадении парафинов ($\text{C}_{24}\text{H}_{50} + \text{C}_{28}\text{H}_{58}$), растворенных в октане

Fig. 5. Temperature dependence of light scattering intensity during precipitation of paraffins ($\text{C}_{24}\text{H}_{50} + \text{C}_{28}\text{H}_{58}$) dissolved in octane

Наблюдается последовательное выпадение двух парафинов из раствора. Следует отметить, что парафины выпадают в виде рыхлых фракций, занимающих существенную часть объема оптической кюветы, что затрудняет четкую фиксацию температур переходов.

Известно, что конденсаты с заметным содержанием парафина (малопарафинистые, среднепарафинистые) имеют желтоватый оттенок.

В эксперименте для измерения температуры выпадения парафинов использованы пробы среднепарафинистого конденсата Уренгойского НКМ.

Полученная кривая представлена на рис. 6.

Температура выпадения парафина из конденсата заметно ниже по сравнению с нефтью. Это объясняется большой концентрацией легких фракций в конденсате. Температура выпадения парафинов из конденсата определяется достаточно уверенно.

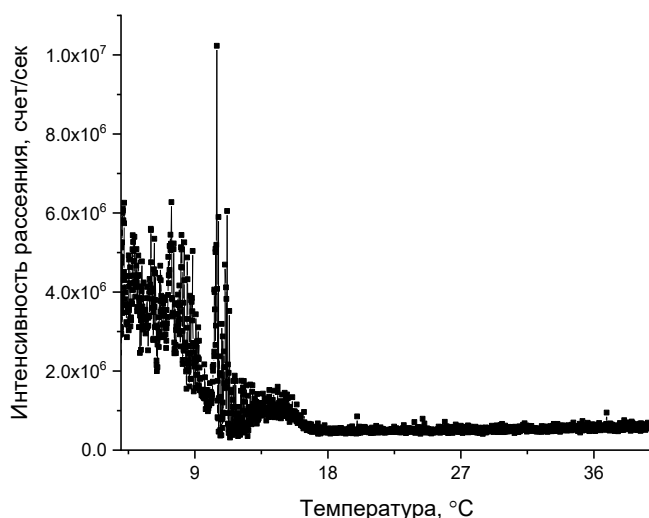


Рис. 6. Температурная зависимость интенсивности рассеяния света для исследования выпадения природных парафинов из конденсата Уренгойского НГКМ. Скорость охлаждения 0,3 °C в час

Fig. 6. Temperature dependence of light scattering intensity for studying the precipitation of natural paraffins from condensate of the Urengoy oil and gas condensate field. Cooling rate of 0.3 °C per hour

Для оценки полученных результатов в пробу конденсата был добавлен парафин $C_{28}H_{58}$ с концентрацией 18 вес%, что значи-

тельно превышает возможную концентрацию данного парафина в конденсате [8, 9]. Результат измерения представлен на рис. 7.

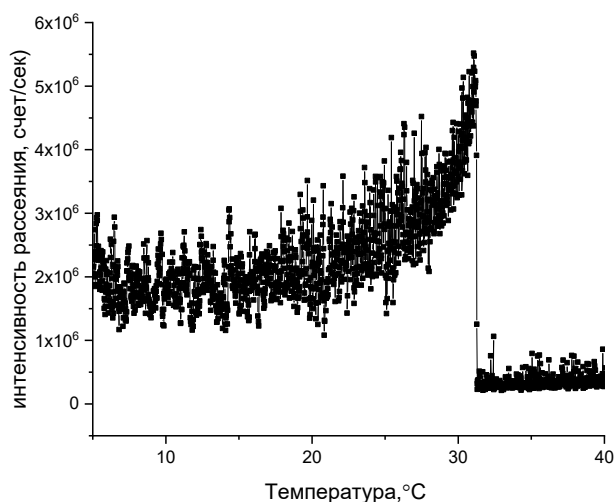


Рис. 7. Температурная зависимость интенсивности рассеяния света для исследования выпадения природных парафинов из конденсата Уренгойского НГКМ с добавкой парафина $C_{28}H_{58}$. Скорость охлаждения 0,3 °C в час

Fig. 7. Temperature dependence of light scattering intensity for studying the precipitation of natural paraffins from condensate of the Urengoy oil and gas condensate field with an addition of $C_{28}H_{58}$ paraffin. Cooling rate of 0.3 °C per hour

При такой высокой концентрации выпавший из конденсата парафин образует при температуре 31 °С сплошную фазу, зани-

мающую весь объем имеющегося в кювете образца [10]. Фотографии кювет с выпавшими парафинами представлены на рис. 8.



Рис. 8. Фотографии кювет с выпавшими парафинами:

- а – смесь парафинов $C_{24}H_{50} + C_{28}H_{58}$ в октане;
 - б – природные парафины в конденсате Уренгойского НГКМ;
 - в - парафины в конденсате Уренгойского НГКМ с добавкой 18 вес% парафина $C_{28}H_{58}$.
- Температура образования твердой фазы – 31 °С

Fig. 8. Photos of cuvetts with precipitated paraffins:

- a – a mixture of $C_{24}H_{50} + C_{28}H_{58}$ paraffins in octane;
 - b – natural paraffins in the condensate of the Urengoy oil and gas condensate field;
 - c – paraffins in the condensate of the Urengoy oil and gas condensate field with an addition of 18 wt% $C_{28}H_{58}$ paraffin.
- The solid phase formation temperature is 31 °C

С учетом достаточной прозрачности для использования метода рассеяния света выпадение парафина может быть удобной моделью процесса образования АСПО, в том числе и при широких вариациях концентрации парафина в конденсате. При этом важно отметить, что температура выпадения парафинов из нефти и конденсата заметно отличается от температуры плавления индивидуальных парафинов. Это вполне объяснимо, поскольку при выпадении парафинов из раствора кроме температуры плавления парафина существенную роль начинает играть и состав растворителя, из которого выпадает парафин.

Предварительный анализ имеющихся публикаций позволяет говорить о новом подходе к исследованию процессов выпадения парафинов из углеводородных систем. Действительно, изучение парафинов вызывает все больший интерес исследователей.

Значительное количество работ посвящено практическим задачам, связанным с добычей и транспортировкой углеводородного сырья [11–13]. Тонкие и интересные эффекты могут оставаться за пределами возможностей исследователей, что в значительной степени объясняется отсутствием необходимой экспериментальной техники, а также относительно простым истолкованием физической природы явления выпадения парафина из углеводородного раствора [14, 15]. При этом важно не оставлять без внимания особенности свойств парафинов, например, таких, как появление ротаторных фаз при кристаллизации парафинов. Температура плавления парафинов довольно низкая. Она близка к температуре выпадения парафинов из углеводородного раствора, например, такого как нефть. Это также может приводить к взаимосвязанным процессам при выпадении парафинов из нефти или конденсата.

Заключение

Проведено прецизионное исследование коллоидных свойств парафинов, входящих в состав различных нефтей и конденсатов, а также некоторых модельных систем парафин – растворитель. Был получен ряд

результатов, которые позволяют более точно определять температуру выпадения парафинов из нефтей и конденсатов. Полученные результаты открывают новые перспективы исследования выпадения парафинов из углеводородных систем.

Вклад авторов

В.А. Дешабо – ресурсы, проведение исследования, создание черновика рукописи.

В.И. Косов – ресурсы, создание рукописи и ее редактирование.

Д.И. Юдин – ресурсы, создание черновика рукописи.

И.К. Юдин – верификация данных, создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование.

Все авторы утвердили окончательную версию статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список источников

1. Дешабо В.А., Кияченко Ю.Ф., Косов В.И. и др. Анализ дисперсных свойств тяжелых фракций углеводородного сырья методом динамического рассеяния света // Вести газовой науки. 2019. № 1(38). С. 172–183. EDN: GEFCTN
2. Александрова Э.А., Александров Б.Л., Хадисова Ж.Т. и др. Влияние поверхностно-активных веществ на температуры кристаллизации и застывания парафина в растворителях различной природы // Химия и технология топлив и масел. 2022. № 4(632). С. 33–38. <https://doi.org/10.32935/0023-1169-2022-632-4-33-38>
3. Rehan M., Nizami A.-S., Taylan O., et al. Determination of wax content in crude oil // Petroleum Science and Technology. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 799–804. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1169287>
4. Рыжов А.Е., Парфёнова Н.М., Григорьев Е.Б. и др. Физико-химическая характеристика конденсатов ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. 2013. № 5(16). С. 91–98. EDN: RTHLNH
5. Иванова И.К., Каширцев В.А., Семенов М.Е. и др. Влияние состава растворителя на содержание кристаллической фазы и температуры плавления парафинов // Журнал прикладной химии, 2020. Т. 93, Вып. 4. С. 600–608. <https://doi.org/10.31857/S0044461820040155>
6. Huang Z., Lu Y., Hoffmann R., et al. The effect of operating temperatures on wax deposition // Energy & Fuels. 2011. Vol. 25, No. 11. P. 5180–5188. <https://doi.org/10.1021/ef201048w>
7. Madsen H.E.L., Boistelle R. Solubility of octacosane and hexatriacontane in different n-alkane solvents // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases. 1979. Vol. 75. P. 1254–1258. <https://doi.org/10.1039/f19797501254>

8. *Mohamed N.H., Zaky M.T., Farag A.S., Fahmy A.F.M.* Separation of paraffin wax using solvent fractionation // *Petroleum Science and Technology*. 2008. Vol. 26, No. 5. P. 562–574. <https://doi.org/10.1080/10916460600809816>
9. *Roenningsen H.P., Bjoerndal B., Baltzer Hansen A., Batsberg Pedersen W.* Wax precipitation from North Sea crude oils: 1. Crystallization and dissolution temperatures, and Newtonian and non-Newtonian flow properties // *Energy & Fuels*. 1991. Vol. 5, No. 6. P. 895–908. <https://doi.org/10.1021/ef00030a019>
10. *Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Ланчаков Г.А.* Теплофизические свойства и фазовые равновесия газовых конденсатов и их фракций. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 344 с. EDN: OLIMWG
11. *Alnaimat F., Ziauddin M.* Wax deposition and prediction in petroleum pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 184. P. 106385. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106385>
12. *Shi B., Hong J., Wang Z., et al.* Treatment of paraffin deposition behavior in gas-condensate wells with chemical inhibitor // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 535–553. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01716-0>
13. *Belati A., Cajaiba J.* Measurement of wax appearance temperature using RGB image analysis and FBRM // *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.110>
14. *Cao L., Ren Y., Wu H., et al.* Temperature-dependent wax precipitation characteristics in gas condensates: Composition, aggregation, and crystallization patterns // *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, No. 5. P. 4809–4826. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10044>
15. *Ali A., Yaghy G., Charpentier T.V.J., Harbottle D.* Effect of asphaltenes on thermally- and shear-driven regimes of wax deposition // *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. Vol. 243. P. 213237. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213237>

Информация об авторах

Виктор Альфредович Дешабо – старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 6388-9952, <https://orcid.org/0000-0002-8092-1197>; e-mail: dechabo@yandex.ru

Виктор Иванович Косов – ведущий инженер, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 2707-6416, <https://orcid.org/0000-0002-0433-859X>; e-mail: kosov@ogri.ru

Дмитрий Игоревич Юдин – младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3866-8324>; e-mail: dmitry.yudin@photocor.com

Игорь Кронидович Юдин – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-5668-6991>; e-mail: yudin@ipng.ru

Поступила в редакцию 12.12.2025

Принята к публикации 07.04.2026

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THERMODYNAMIC FEATURES AND PHASE BEHAVIOR OF HYDROCARBON MIXTURES

Original article

Measurement of paraffin precipitation temperature from oil and gas and model hydrocarbon solutions using light scattering

Viktor A. Deshabo, Viktor I. Kosov, Dmitry I. Yudin, Igor K. Yudin ✉

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russia

Abstract. *Background.* Light scattering is a sensitive experimental method for testing colloidal characteristics in various systems. In recent years, special versions of light scattering instruments have been used to study colloidal fractions of oil, such as asphaltenes, resins, and paraffins. *Objective.* A precision study of the colloidal properties of paraffins found in various oils and condensates, as well as in some model paraffin–solvent systems. *Materials and methods.* The studies were conducted using an optical analyzer of the dispersive properties of hydrocarbon systems developed at the Laboratory of Phase Transitions and Critical Phenomena. Samples of the Ob River area oil, condensates from the Urengoy field, and model solutions of paraffins in octane were investigated. *Results.* As an outcome of the work, a number of results were obtained that allow for a more accurate determination of the temperature at which paraffins precipitate from oils and condensates. In addition, a characteristic multippeak graph was obtained for oil, which shows the individual components of paraffins present in the oil. *Conclusion.* A precision study of the colloidal properties of paraffins found in various oils and condensates, as well as in some model paraffin–solvent systems, was conducted. The obtained results open up new prospects for studying the precipitation of paraffins from hydrocarbon systems.

Keywords: paraffins, light scattering, temperature dependence, asphaltene–resin–paraffin fractions

Funding: the work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 125020501404-4).

Acknowledgments: the authors are grateful to their colleagues Yury F. Kiyachenko, Vitaly E. Podnek, and Albert F. Sharipov (OGRI RAS) for their useful discussions of the obtained results, as well as for providing samples of paraffins and natural condensates from the Urengoy oil and gas condensate field for research. They also thank Evgeniya A. Nikitina (VNIIneft) for the oil samples from the Priobskoye oil field, which were used to successfully demonstrate the functionality of devices for analyzing the paraffin content in oil.

For citation: Deshabo V.A., Kosov V.I., Yudin D.I., Yudin I.K. Measuring paraffin precipitation temperatures from oil and gas and model hydrocarbon solutions using light scattering. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 21–33. (In Russ.).

✉ Igor K. Yudin, yudin@ipng.ru

© Deshabo V.A., Kosov V.I., Yudin D.I., Yudin I.K., 2026



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Viktor A. Deshabo – resources, investigation, writing – original draft.

Viktor I. Kosov – resources, writing – review & editing.

Dmitry I. Yudin – resources, writing – original draft.

Igor K. Yudin – validation, writing – original draft, writing – review & editing.

All the authors approved the final version of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

References

1. Deshabo V.A., Kiyachenko Yu.F., Kosov V.I., et al. Analyzing dispersion properties of heavy hydrocarbon fractions using a method of dynamic light scattering. *Vesti gazovoy nauki*. 2019. No. 1(38). P. 172–183. (In Russ.).
2. Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L., Khadisova Zh.T., et al. Effect of surfactants on the crystallization and solidification temperatures of paraffin in various types of solvents. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022. Vol. 58, No. 4. P. 608–614. <https://doi.org/10.1007/s10553-022-01426-z>
3. Rehan M., Nizami A.-S., Taylan O., et al. Determination of wax content in crude oil. *Petroleum Science and Technology*. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 799–804. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1169287>
4. Ryzhov A.E., Parfenova N.M., Grigoriev E.B., et al. Physicochemical characteristics of condensates from the Achimov deposits of the Urengoy oil and gas condensate field. *Vesti gazovoy nauki*. 2013. No. 5(16). P. 91–98. (In Russ.).
5. Ivanova I.K., Kashirtsev V.A., Semenov M.E., et al. Effect of the solvent composition on the content of the crystalline phase and melting temperature of paraffin waxes. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2020. Vol. 93, No. 4. P. 603–610. <https://doi.org/10.1134/S1070427220040163>
6. Huang Z., Lu Y., Hoffmann R., et al. The effect of operating temperatures on wax deposition. *Energy & Fuels*. 2011. Vol. 25, No. 11. P. 5180–5188. <https://doi.org/10.1021/ef201048w>
7. Madsen H.E.L., Boistelle R. Solubility of octacosane and hexatriacontane in different n-alkane solvents. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*. 1979. Vol. 75. P. 1254–1258. <https://doi.org/10.1039/f19797501254>
8. Mohamed N.H., Zaky M.T., Farag A.S., Fahmy A.F.M. Separation of paraffin wax using solvent fractionation. *Petroleum Science and Technology*. 2008. Vol. 26, No. 5. P. 562–574. <https://doi.org/10.1080/10916460600809816>
9. Roenningsen H.P., Bjoerndal B., Baltzer Hansen A., Batsberg Pedersen W. Wax precipitation from North Sea crude oils: 1. Crystallization and dissolution temperatures, and Newtonian and non-Newtonian flow properties. *Energy & Fuels*. 1991. Vol. 5, No. 6. P. 895–908. <https://doi.org/10.1021/ef00030a019>
10. Grigoriev B.A., Gerasimov A.A., Lanchakov G.A. *Thermophysical Properties and Phase Equilibria of Gas Condensates and Their Fractions*. Moscow: MPEI Publishing House, 2007. 344 p. (In Russ.).

11. Alnaimat F., Ziauddin M. Wax deposition and prediction in petroleum pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 184. P. 106385. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106385>
12. Shi B., Hong J, Wang Z., et al. Treatment of paraffin deposition behavior in gas-condensate wells with chemical inhibitor. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 535–553. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01716-0>
13. Belati A., Cajaiba J. Measurement of wax appearance temperature using RGB image analysis and FBRM. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.110>
14. Cao L., Ren Y., Wu H., et al. Temperature-dependent wax precipitation characteristics in gas condensates: Composition, aggregation, and crystallization patterns. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, No. 5. P. 4809–4826. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10044>
15. Ali A., Yaghy G., Charpentier T.V.J., Harbottle D. Effect of asphaltenes on thermally- and shear-driven regimes of wax deposition. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. Vol. 243. P. 213237. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213327>

Information about the authors

Viktor A. Deshabo – Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8092-1197>; e-mail: dechabo@yandex.ru

Viktor I. Kosov – Leading Engineer, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0433-859X>; e-mail: kosov@ogri.ru

Dmitry I. Yudin – Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3866-8324>; e-mail: dmitry.yudin@photocor.com

Igor K. Yudin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-5668-6991>; e-mail: yudin@ipng.ru

Received 12 December 2025

Accepted 7 April 2026