

МОДИФИКАЦИЯ ЗАКОНА БУГЕРА–ЛАМБЕРТА–БЕРА ДЛЯ ИК-АНАЛИЗА ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Филатов В.М., Растворова И.И.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия
vladislav-fil01@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в развитии методов анализа высоковязкой нефти, доля которой в мировых запасах и добыче непрерывно растет. Точный экспресс-анализ состава такой нефти необходим для оптимизации её добычи, транспорта и подбора химических присадок, повышающих подвижность. Однако применение классического закона Бугера–Ламберта–Бера (БЛБ) затруднено из-за сильного рассеяния излучения и нелинейности оптического отклика, обусловленных сложной многокомпонентной структурой высоковязкой нефти. ЦЕЛЬ. Разработать модифицированную модель закона БЛБ, учитывающую влияние реологических свойств и рассеяния света на асфальтеново-смолистых агрегатах. Предложить новую модель, связывающую эффективный коэффициент поглощения со структурными параметрами нефти. Обосновать эффективность ультразвуковой (УЗ) обработки как метода пробоподготовки для повышения однородности нефтяной среды. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялось теоретическое моделирование и механизмы УЗ обработки, и её влияние на оптические свойства. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что учет реологических свойств и рассеяния излучения необходим для адекватного описания прохождения инфракрасного (ИК) луча через высоковязкую нефть. Предложенная модификация закона БЛБ включает дополнительные члены, учитывающие оптическую плотность от рассеяния на частицах. Обоснована эффективность УЗ обработки: ультразвук снижает вязкость и неоднородность нефти, увеличивая пропускание ИК-излучения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Интеграция реологических факторов в закон БЛБ и применение УЗ пробоподготовки значительно повысят точность ИК-анализа высоковязкой нефти. Это позволит более надежно определять функциональный состав высоковязких нефтей для решения задач повышения нефтеотдачи, оптимизации процессов и безопасности трубопроводного транспорта. УЗ обработка обеспечивает безреагентное снижение вязкости и рассеяния, что делает её перспективным методом пробоподготовки для экспресс-анализа.

Ключевые слова: высоковязкая нефть; инфракрасная спектроскопия; закон Бугера–Ламберта–Бера; надежность трубопроводов; реологические свойства; ультразвуковая обработка; вязкостные присадки.

Для цитирования: Филатов В.М., Растворова И.И. Модификация закона Бугера–Ламберта–Бера для ИК-анализа высоковязкой нефти // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 17-33. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-17-33.

MODIFICATION OF THE BOUGUER-LAMBERT-BAER LAW FOR HIGH-VISCOSITY OIL IR-ANALYSIS

Filatov V.M., Rastvorova I.I.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
vladislav-fil01@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the research lies in the development of methods for analyzing high-viscosity oil, whose share in world reserves and production is continuously growing. Accurate rapid analysis of the composition of such oil is necessary to optimize its production, transportation, and selection of chemical additives that increase mobility. However, application

of the classical Bouguer-Lambert-Baer (BLB) law is difficult due to strong scattering of radiation and nonlinearity of optical response caused by complex multicomponent structure of high viscosity oil. **THE PURPOSE** is to develop a modified model of BLB law that takes into account rheological properties, and light scattering by asphaltene-resinous aggregates, and propose new model linking effective absorption coefficient to structural parameters of oil. **METHODS.** To substantiate the effectiveness of ultrasonic treatment as a method for sample preparation to improve the linearity of an oil medium, we used theoretical modeling and mechanisms for ultrasonic processing and its effects on optical properties. **RESULTS.** We show that consideration of rheological properties and light scattering is essential for an adequate description of the transmission of infrared (IR) radiation through viscous oil. The proposed modification to the BLB law incorporates additional terms to account for optical density due to particle scattering. Ultrasonic treatment reduces viscosity and heterogeneity, improving the transmission of IR radiation, which justifies its effectiveness. **CONCLUSION.** Integrating rheological factors into the BLB model and using ultrasonic preparation improves the accuracy of IR analysis of viscous oils. This will make it possible to more reliably determine the functional composition of high-viscosity oils in order to solve problems of increasing oil recovery, optimizing processes, and pipeline transport safety. Ultrasonic treatment provides a non-reactive reduction in viscosity and scattering, making it a promising method for sample preparation for rapid analysis.

Keywords: high viscosity oil; infrared spectroscopy; Bouguer–Lambert–Baer's law; pipeline reliability; rheological properties; ultrasonic treatment; viscous additives.

For citation: Filatov V.M., Rastvorova I.I. Modification of the Bouguer-Lambert-Baer law for high-viscosity oil IR-analysis. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 17-33. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-17-33.

Введение (Introduction)

Нефть на протяжении десятилетий остается ключевым энергетическим ресурсом, играющим фундаментальную роль в мировой экономике и геополитике. Запасы высоковязкой и тяжелой нефти существенно превосходят по объему традиционные легкие нефтяные ресурсы, что придает им доминирующее значение в структуре нефтяных запасов Российской Федерации и мира в целом [1, 2]. В условиях истощения легких нефтей и ограниченного роста альтернативных энергетических источников высоковязкие нефти представляют собой критически важный ресурс для обеспечения долгосрочной энергетической безопасности и суверенности государства, владеющими ими.

Товарный цикл высоковязкой нефти сопряжен с рядом комплексных технологических и эксплуатационных проблем, обусловленных ее низкой текучестью, значительными концентрациями смол, асфальтенов, парафинов и серы [2]. Для повышения эффективности добычи, транспортировки и обеспечения оперативного контроля качества продукции актуальным представляется применение сетевых цифровых технологий, базирующихся на внедрении интеллектуальных систем, интегрируемых в промышленную инфраструктуру месторождений.

Одним из перспективных направлений является использование ИК-спектроскопии, которая характеризуется повышенной проникающей способностью и высокой чувствительностью к компонентному составу нефтяных проб. Применение ИК-спектрометров непосредственно в полевых условиях позволит получать оперативные количественные и качественные характеристики [3] высоковязкой нефти, что будет способствовать оптимизации технологических процессов добычи, снижению эксплуатационных издержек, предварительному контролю состава нефти и выбору оптимального метода транспортировки сырья, а также повышению надежности оборудования, связанного с товарными циклами нефти [4]. Кроме того, в отличие от ионизирующих методов анализа, ИК-спектроскопия исключает риск радиационного воздействия на персонал и окружающую среду. При этом, с учетом современного уровня развития лазерных диодов и оптических компонентов, создание компактных, надежных и сравнительно недорогих ИК-спектрометров становится технически и экономически оправданным [5], что облегчает их широкое внедрение в цифровую инфраструктуру нефтедобывающих предприятий.

Наиболее значимой проблемой, присущей ИК-диагностике, является низкая оптическая прозрачность высоковязких образцов нефти, что приводит к существенному

затемнению экстремумов на спектрах и снижению отношения «сигнал/шум» спектрометров. Кроме того, используемый в основе ИК-анализа закон БЛБ малоэффективен вследствие нелинейности свойств нефтяной среды [6]. Перечисленные проблемы существенно затрудняют получение достоверной информации о химическом составе и структурных характеристиках нефтяного сырья.

Целью данной работы является модификация закона БЛБ и теоретическое обоснование применения УЗ обработки нефти как способа приведения нефти к состоянию оптически линейной среды.

Научная значимость исследования состоит в формировании комплексного представления о влиянии оптической непрозрачности нефти на характеристики ИК-спектров и в совершенствовании методики ИК-анализа на основе модификации закона БЛБ и обосновании альтернативного способа пробоподготовки ультразвуком.

Практическая значимость исследования состоит в повышении эффективности и точности методов ИК-диагностики высоковязкой нефти, что способствует улучшению контроля качества высоковязкого нефтяного сырья. Это позволит наиболее эффективно контролировать технологические процессы непосредственно во время добычи, а также предварительно подбирать оптимальные способы транспортировки, обеспечивая повышение надежности и безопасности трубопроводов.

В области ИК-спектроскопии и анализа нефти ключевыми являются следующие исследования.

Раупов И.Р. и др. установили связь между оптическими и реологическими свойствами нефти, предложили ряд конструкций приборов для оперативного анализа нефти в промысловых условиях [7]. К недостаткам конструкций следует отнести неоднозначность способа проведения оптического анализа – где-то используется отражение, где-то пропускание, что усложняет процесс проведения измерений.

Santos F. и др. разработали портативное ИК-устройство с методом опорной векторной регрессии для определения плотности по API и химического состава нефти [8]. В результатах представлено сравнение портативного ИК-устройства и лабораторного ИК-спектрометра. Портативный спектрометр значительно уступил лабораторному при определении насыщенных углеводородов, ароматики и асфальтенов.

Xu S. И др. усовершенствовали спектрометрический метод идентификации сырой нефти в ближнем ИК-диапазоне частот посредством устранения выбросов в результатах измерений введением улучшенного расстояния Махаланобиса [9].

Yang S-B. и др. повысили производительность ИК-метода прогнозирования свойств нефти посредством уменьшения размерности выходных данных введением комбинации способов обработки данных – анализа главных компонент и опорной векторной регрессии [10].

Moro M. и др. представили метод комбинации данных, полученных в ходе измерений посредством спектрометров ближнего и среднего ИК-диапазонов [11]. Совмещение данных позволило получить модели с более высокой точностью прогнозирования свойств нефти и ее дальнейшей классификации.

Asemani M. и др. представили метод разрешения спектра асфальтенов при проведении ИК-Фурье анализа посредством аппроксимации кривой [12].

Mokari A. и др. решили проблему затруднения прямой интерпретации данных посредством избегания закона БЛБ и перехода к прямому спектральному анализу с помощью машинного и глубокого обучения [13].

В области пробоподготовки и фундаментальных ограничений моделей можно выделить следующие исследования:

Растворова И.И. и др. исследовали влияние УЗ обработки на оптическую плотность, температуру нагрева нефти [14]. В работе выявлены проблемы неравномерности распределения УЗ колебаний в нефти, неравномерности среды, объясняющейся объединением компонентов в эмульсионные глобулы и агломераты, что, в свою очередь, снижает пропускаемость ИК-излучения образцом нефти.

Sargazi M. и др. рассмотрели альтернативные растворителям способы подготовки образцов, в ходе чего выделили УЗ экстракцию как метод, преимущество которого над применением растворителей заключается в способности улучшать извлечение благодаря физико-химическим эффектам, таким как акустическая кавитация, возмущение, фрагментация, эмульгирование и эрозия, усиливающим массообмен и обеспечивающим лучшую производительность [15].

Mayerhöfer T.G. и др. разработали руководство, помогающее понять спектральные особенности, не объяснимые законом БЛБ из-за электромагнитных эффектов и волновой

природы света, включая сдвиги полос и изменения интенсивности, зависящие от оптических условий [16]. Исследование подчеркивает ограниченность закона БЛБ в применении к оптическим исследованиям в целом, обусловленную динамическим характером исследуемых сред.

Как показывает представленный выше литературный обзор, исследования в области ИК-анализа, предварительной пробоподготовки к ИК-анализу и уточнению закона БЛБ для динамических систем являются актуальными.

Отличие представленной работы заключается в том, что в ней предложено оригинальное усовершенствование закона БЛБ для ИК-анализа высоковязкой нефти путём дополнения его параметром, отвечающим за рассеивание излучения. Также предложен способ повышения однородности нефти посредством предварительной УЗ обработки, позволяющей приблизить нефть к линейным жидкостям.

Материалы и методы (Materials and methods)

Настоящее исследование носит теоретико-аналитический и методический характер. Его основу составляет комплексный анализ современных научных публикаций (преимущественно 2020–2026 гг.), посвященных оптике дисперсных сред, реологии высоковязких нефтей. Работа направлена на разработку концептуальной модели, повышающей адекватность интерпретации ИК-спектров нефти, и на обоснование УЗ метода пробоподготовки для реализации условий её применимости.

Объектом исследования являются высоковязкие нефти. Предметом исследования — их оптические свойства в ИК-диапазоне, формируемые в условиях микрогетерогенности среды. Ключевое внимание уделяется системам, в которых оптическое поведение в ИК-диапазоне определяется не только молекулярным поглощением, но и значительным вкладом рассеяния на дисперсных фазах: нано- и микроагрегатах асфальтенов, смолисто-парафиновых комплексах и стабилизированных водонефтяных эмульсиях. Эти структурные элементы рассматриваются как единый параметр микронеоднородности, связывающий реологию и оптику.

Проблема применимости закона Бугера–Ламберта–Бера (The problem of the applicability of the Bouguer-Lambert-Baer law)

Классический закон БЛБ устанавливает, что при прохождении монохроматического излучения через однородный поглощающий слой интенсивность излучения экспоненциально снижается с увеличением концентрации поглощающего вещества C и толщины слоя l :

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot l} \quad [17], \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ и $I(\lambda)$ – интенсивность падающего и прошедшего ИК-излучения при заданной длине волны λ ; $\varepsilon(\lambda)$ – молярный коэффициент поглощения вещества при заданной длине волны λ . В логарифмической форме Выражение 1 представляет собой оптическую плотность $Cl a(\lambda)$:

$$Cl a(\lambda) = \ln \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right) = \varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot l \quad [7, 14]. \quad (2)$$

Из выражения 2 видно, что классический закон БЛБ предполагает линейную связь между оптической плотностью и концентрацией. Однако в реальных условиях, когда нарушается предположение о линейности, лежащее в основе закона БЛБ [18, 19], наблюдаются серьезные отклонения. Например, в случае тяжёлых нефтей это предположение не выполняется по следующим причинам:

Нефтяная среда неоднородна на микроскопическом уровне. Высоковязкая нефть не является истинным раствором отдельных молекул, а представляет собой микрогетерогенную среду. В ней присутствуют асфальтеновые агрегаты, коллоидные частицы, водонефтяные глобулы, пузырьки газа и другие неоднородности размером от нанометров до десятков микрометров [20, 21]. Если же размер неоднородностей сравним или больше длины волны ИК-излучения, то луч рассеивается и не испытывает равномерного поглощения на всём пути распространения [22].

Нефтяная среда многокомпонентна и многофазна. Тяжелая нефть содержит несколько классов химических соединений (парафины, нафтены, тяжелая и легкая ароматика, смолы, асфальтены и пр.) в разных фазовых состояниях (жидкая непрерывная фаза, твёрдые осадки парафинов, дисперсные частицы асфальтенов, эмульгированная вода, растворённые газы) [23, 24]. Закон БЛБ в простейшей форме подразумевает один поглотитель или эффективную сумму поглощающих компонентов в одной фазе. В реальности же разные компоненты по-разному поглощают ИК-лучи, а присутствие отдельных фаз (например, капель воды или твёрдых частиц) может приводить к дополнительному рассеянию и отражению.

Нефтяная среда обладает высоким собственным поглощением и преломлением. Высокомолекулярные компоненты нефти (смолы, асфальтены) сильно поглощают ИК-излучение, особенно в среднем ИК-диапазоне длин волн. При большой толщине слоя нефти это приводит к почти полному поглощению определённых спектральных областей – и, как следствие, к насыщению соответствующих полос в спектре. Это явление нарушает линейность закона БЛБ из-за того, что измеряемый сигнал в этих областях достигает предела, определяемого как свойствами образца, так и динамическим диапазоном детектора [25]. Кроме того, высокий показатель преломления и оптическая неоднородность нефти приводят к значительным отражениям на границах раздела в ИК-спектрометрах (стенка кюветы – нефть, нефть – воздух), что вызывает искажения, не учитываемые в классическом законе БЛБ [26, 27]. Наличие параллельных оптических поверхностей кюветы и неоднородностей внутри образца способствует многократным отражениям, порождающим интерференционные полосы (фринги) и, как следствие, отклонения от экспоненциальной формы закона [28, 29].

В совокупности перечисленные выше факторы означают, что применение классического закона БЛБ к тяжёлой нефти даёт завышенные поглощения и перекрытия соседних экстремумов на спектрограмме. Кроме того, зависимость между концентрацией компонента и оптической плотностью – нелинейная [16, 30]. Экспериментально это проявляется в виде очень низких значений интенсивности излучения, прошедшего через образец ($I(\lambda) \ll I_0(\lambda)$) даже при небольшом слое нефти, из-за чего ИК-спектрометры демонстрируют низкое отношение «сигнал/шум», сглаженные или искаженные пики поглощения [25]. Пример ИК-спектрограммы сырой высоковязкой смолистой нефти, динамическая вязкость μ которой при температуре 10°C составляет 988 мПа·с, представлен на рисунке 1.

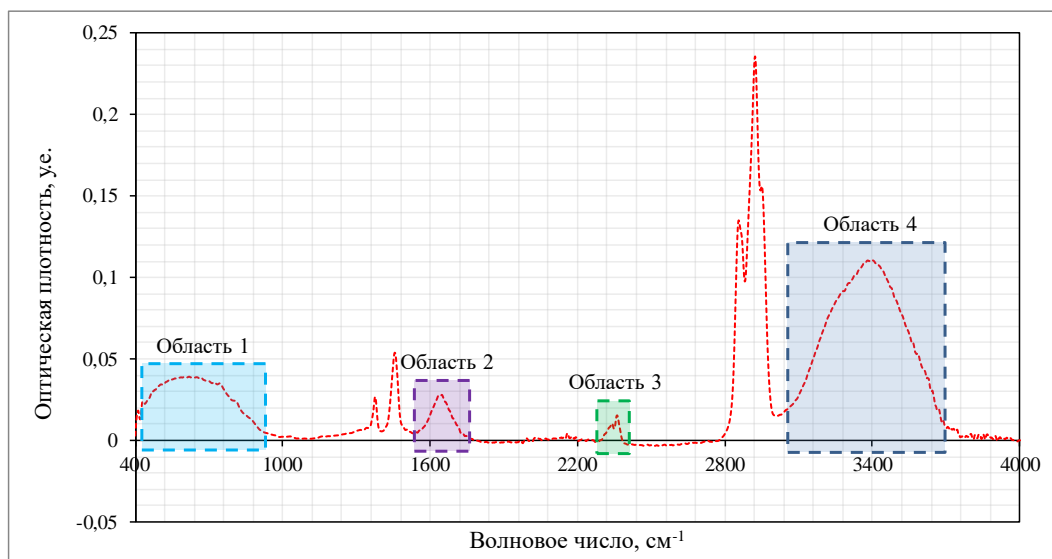


Рис. 1. ИК-спектр сырой высоковязкой нефти с выделенными областями, полученный ИК-спектрометром IRAffinity-1

Fig. 1. IR spectrum of high-viscosity crude oil with selected areas, obtained by the IRAffinity-1 IR spectrometer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 1 выделено четыре основные спектральные области. В области 1 наблюдается широкий сглаженный максимум, который формируется за счёт перекрытия полос поглощения в интервалах 730–770 см⁻¹ и 790–840 см⁻¹, характерных для ароматических углеводородов. Кроме того, в этом же спектральном диапазоне могут проявляться полосы поглощения тиофенов, указывающих на присутствие серосодержащих соединений в нефти и ее коррозионных свойств.

В области 2 наблюдается сглаженный экстремум в районе 1630–1650 см⁻¹, соответствующий деформационным колебаниям связи Н–О–Н, что указывает на присутствие воды в образце. Однако в этой же области проявляются и другие важные полосы поглощения – ароматические С=C колебания, характерный пик которых расположен в области 1600 см⁻¹, часто в виде двойных или тройных пиков в областях 1580, 1600, 1620 см⁻¹, а также колебания С=О карбонильных групп (альдегиды, кетоны, кислоты) в диапазоне 1700–1720 см⁻¹. Пик 1640 см⁻¹ часто является доминирующим и может полностью перекрывать более слабые сигналы ароматических и карбонильных

структур. Наложение, уширение и смещение этих полос существенно затрудняет спектральную деконволюцию, что приводит к погрешностям в количественной оценке, поскольку вся интенсивность при 1640 см^{-1} может быть ошибочно отнесена к воде, тогда как часть поглощенной энергии сигнала может принадлежать ароматическим углеводородам.

Область 4 охватывает широкую полосу поглощения в диапазоне $3000\text{--}3700\text{ см}^{-1}$, которая соответствует преимущественно валентным колебаниям O–H-связей воды и может указывать на присутствие водонефтяной эмульсии. Интенсивная полоса O–H может маскировать или существенно затруднять идентификацию ряда важных функциональных групп. Во-первых, это осложняет оценку ароматичности, поскольку характерные ароматические C–H колебания проявляются в виде слабого экстремума в области 3030 см^{-1} . Во-вторых, становится невозможным или недостоверным определение азотсодержащих примесей таких как амины в области $3300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ и амиды в области $3100\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, важных для оценки качества нефти и её коррозионной активности. Кроме того, могут быть скрыты сигналы других функциональных групп, таких как карбоновые кислоты и фенолы, чьи полосы поглощения также попадают в этот спектральный диапазон.

Кроме того, при значительном содержании воды её широкая полоса может распространяться в область около 2900 см^{-1} , создавая риск спектрального наложения с сигналами алифатических C–H-колебаний (2920 и 2850 см^{-1}), что дополнительно исказит интерпретацию состава нефти.

Связь реологических и оптических свойств тяжёлой нефти (The relationship between rheological and optical properties of heavy oils)

Прежде чем модифицировать закон поглощения, необходимо рассмотреть, каким образом реологические свойства нефти (вязкость, плотность, структурно-механические параметры) связаны с её оптическими характеристиками в ИК-диапазоне. Высокая вязкость нефти является следствием высокого содержания тяжёлых фракций и их межмолекулярных взаимодействий. Химический состав нефти напрямую влияет на плотность и вязкость; например, увеличение доли смол и асфальтенов резко повышает вязкость и плотность. Те же компоненты определяют и оптическое поведение: асфальтены и смолы содержат ароматические ядра и полярные группы, дающие интенсивные полосы поглощения в ИК-спектрах. Например, ароматические C–H колебания 3050 см^{-1} , C=C колебания 1600 см^{-1} , C=O колебания 1700 см^{-1} у смол и способные образовывать агрегаты, которые рассеивают ИК-излучение [20, 21]. Парафины, насыщенные углеводороды, в свою очередь, при понижении температуры структурообразуются в микрокристаллы воска, вызывая как рост предельной вязкости, так и помутнение нефти [31]. Таким образом, факторы, повышающие вязкость нефти (асфальтено-смолистые ассоциации, парафиновые кристаллы, вода, механические примеси) повышают её оптическую плотность, снижая оптическую прозрачность. Напротив, процессы, снижающие вязкость – разжижение нефти при нагреве, введение растворителей или диспергаторов – приводят к разрушению тех же структур, уменьшению их размеров и количества, что увеличивает долю проходящего ИК-излучения. Иными словами, нефть становится оптически более линейной.

Например, корреляция между химическим составом и вязкостью проявляется в том, что ароматичность нефти (доля ароматических углеводородов и смол) хорошо согласуется с её реологическим поведением. Доказано, что при высоком содержании ароматических углеводородов нефти обладают высокой структурной прочностью из-за образования асфальтеновых кластеров [32]. Добавление же высокополярных присадок по типу ПАВ способно разрушать эти ассоциаты, тем самым сразу снижая и вязкость, и оптическую мутность нефти. Так, в работе [33] показано, что натуральная добавка – нанопорошок окры, содержащая полярные группы C=O, O–H, при смешении с тяжёлой нефтью разрывает межмолекулярные водородные связи между асфальтено-смолистыми молекулами, что приводит к снижению вязкости. Одновременно Фурье-ИК-спектры нефти после добавления окры продемонстрировали уменьшение интенсивности полос, характерных для ассоциированных тяжёлых фракций, и общему повышению прозрачности образца. Аналогично синтезированный анионный сурфактант PE-54 при введении в тяжёлую нефть диспергирует асфальтеновые агрегаты, разрушая внутренние ассоциации, и тем самым уменьшает вязкость нефти более чем на 90% [34]. Эти примеры подтверждают, что реологические показатели тесно связаны с оптическими. Иными словами, нефть с высоким содержанием дисперсных агрегатов имеет высокую вязкость и одновременно сильное рассеяние, и поглощение ИК-лучей. Поэтому учитывая вязкость

или связанные с ней параметры, например концентрацию асфальтенов или степень структурированности можно скорректировать модель поглощения света.

Модификация закона Бугера-Ламберта-Бера (*Modification of the Bouguer-Lambert-Baer law*)

Общий подход состоит в добавлении слагаемых к показателю экспоненты, отвечающих за дополнительные механизмы ослабления луча: рассеяние, отражение и физические свойства нефти. Пусть нефть содержит N различных поглощающих компонентов/химических групп. Тогда без учёта рассеяния закон БЛБ обобщается до суммы вкладов от всех компонентов:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot l} \quad (3)$$

где $\varepsilon_i(\lambda)$ – молярный коэффициент поглощения для i -го компонента при заданной длине волны λ ; C_i – концентрация i -го компонента в смеси.

Модель (3) по-прежнему предполагает однородное распределение всех компонентов и отсутствие каких-либо оптических потерь кроме поглощения. Для разбавленной химическими реагентами нефти, когда все тяжелые фракции растворены эта аддитивность часто выполняется. Например, интенсивность полос парафиновых и ароматических С–Н групп в ИК-спектре нефтепродуктов складывается из вкладов каждого класса углеводов. Выражение (3) плохо описывает экспериментальный спектр, т.к. часть тяжелых компонентов находится не в молекулярно-рассеянном состоянии, а в виде агрегатов. Эти агрегаты могут выпадать в осадок или образовывать отдельную фазу, например, асфальтеновые мицеллы диаметром 50–100 нм. В спектроскопическом плане это проявляется в том, что некоторые функциональные группы скрыты внутри образованных неоднородностей и не дают ожидаемого вклада в поглощение [19, 22]. Кроме того, если агрегаты достаточно велики, они вносят не поглощение, а рассеяние света, что не учитывается в Выражении (3).

Введём коэффициент ослабления из-за рассеяния σ_s , компенсирующий энергию рассеянных фотонов, не достигающих фотодетектора, и данные потери регистрируются как дополнительное поглощение. Тогда, с учетом, что σ_s зависит от длины волны ИК-излучения λ и параметра фазового состояния частиц ξ , Выражение (3) можно преобразовать в следующий вид:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot l + \sigma_s(\lambda, \xi) \cdot l)} \quad (4)$$

Параметр фазового состояния частиц ξ представляет собой нововведение по сравнению с классическим законом БЛБ. Его можно оценить, например, по снижению прямолинейно прошедшей интенсивности при добавлении в среду рассеивающих частиц заданной концентрации. В первом приближении σ_s пропорционален объёмной концентрации дисперсных неоднородностей и зависит от их размера d относительно длины волны λ . Для мелких частиц ($d \ll \lambda$) рассеяние происходит в режиме Рэлея, для крупных ($d \sim \lambda$) – по Ми-режиму с более слабой зависимостью от λ . В работе [21] отмечено, что асфальтено-смолистые полимолекулярные слои могут достигать десятков микрометров толщины, т.е. могут превышать длины волн ИК-спектра – следовательно, такие структуры полностью рассеивают или блокируют ИК-спектр, приводя к большим потерям энергии сигнала. Присутствие парафиновых кристаллов также существенно повышает мутность нефти [31]. Учёт члена σ_s позволяет учесть перечисленные эффекты. Даже с учетом того, что химические концентрации компонентов C_i неизменны, рост количества или размера агрегатов, например, при снижении температуры или при долгом хранении нефти будет отражаться на увеличении σ_s и, соответственно, на уменьшении $I(\lambda)$.

Следует подчеркнуть, что рассеяние не сохраняет спектральной специфичности, в отличие от истинного поглощения. Наличие сильного рассеяния проявляется в виде повышенного фонового базового уровня поглощения на всём спектре и сниженного отношения «сигнал/шум» [25], но не искажает относительные интенсивности отдельных полос поглощения компонентов.

На следующем этапе необходимо учесть поверхностные отражения и эффекты на границе раздела сред. Как отмечалось, на границе воздух–нефть и нефть–стенки кюветы происходит частичное отражение падающего и выходящего пучка. В простейшем случае плоскопараллельной кюветы с нефтью коэффициенты пропускания на входе и выходе равны $(1 - R_i)$, где R_i – отражательная способность на границе раздела сред на входе или выходе из кюветы, которая согласно законам Френеля, зависит от показателя преломления нефти n и свойств материала, из которого изготовлена кювета. Тогда выражение (4) можно преобразовать в следующий вид:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot e^{-(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot l + \sigma_s(\lambda, \xi) \cdot l)} \quad (5)$$

где R_1 и R_2 – отражения на первой и второй гранях слоя нефти соответственно. Структурная схема модели (5) представлена на рисунке 2.

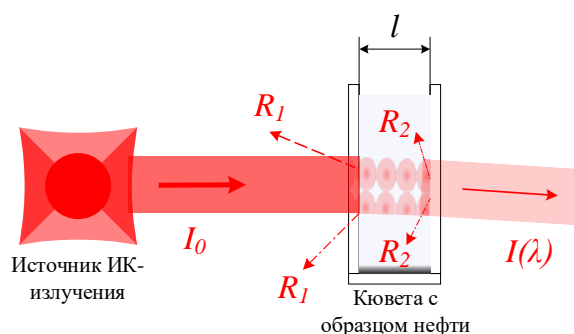


Рис. 2. Оптическая схема прохождения ИК-излучения через кювету с нефтью

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Важно отметить, что полученное Выражение (5) не учитывает многократные отражения внутри образца, которые могут приводить к интерференционным картинкам, вызванным стоячими волнами [27]. Строгое описание этих эффектов требует учета волновой оптики. Однако влияние данных эффектов можно уменьшить, используя матовые ячейки или некогерентное излучение. Поэтому в рамках данной модели ограничимся внесением поправочного множителя $K \approx (1 - R_1) \cdot (1 - R_2)$, который для конкретной экспериментальной системы можно измерить отдельно. Данное нулевое измерение можно провести по изменению интенсивности при заполнении пустой кюветы нефтепродуктом известного показателя преломления.

Таким образом, модифицированный закон БЛБ для высоковязкой нефти можно записать в обобщенном виде:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot K \cdot e^{-(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(\lambda) \cdot c_i \cdot l + \sigma_s(\lambda, \xi) \cdot l)}. \quad (6)$$

где $\sigma_s(\lambda, \xi)$ зависит от параметра ξ , характеризующего структурное состояние нефти. В качестве ξ можно выбрать, например, реологические свойства нефти – динамическую вязкость μ или плотность ρ , а в более сложном варианте – концентрацию дисперсной фазы – объёмную долю асфальтенов или процент твердых частиц, которые наиболее влияют на рассеяние. Функциональный вид зависимости $\sigma_s(\xi)$ может быть установлен эмпирически. Проверить модель можно, сравнивая спектры одной и той же нефти в разных реологических состояниях – например, до и после разжижения. Такую проверку фактически проводят во многих исследованиях, где разбавление тяжёлой нефти растворителями приводит к повышению чёткости спектров и снижению интенсивности полос после приведения образцов к одинаковой оптической толщине l [35]. Это свидетельствует о снижении σ_s при уменьшении ξ , что говорит о прямой связи между σ_s и ξ .

Ультразвуковая обработка как метод гомогенизации нефтяных систем (Ultrasonic treatment as a method of homogenizing oil systems)

Одним из перспективных решений для дополнительного повышения справедливости закона БЛБ для ИК-анализа высоковязкой нефти является пробоподготовка образцов посредством УЗ воздействия. Ультразвук в жидкости вызывает акустокавитацию – образование и схлопывание пузырьков, генерирующих локальные зоны высокого давления и температуры. Для высоковязкой нефти ультразвук способствует сразу нескольким полезным процессам: дегазации, диспергированию твердых структур, разделению водонефтяной эмульсии и частичному разрушению длинных углеводородных цепей. Все эти эффекты ведут к снижению вязкости и повышению прозрачности нефти [14]. Рассмотрим этот процесс более подробно.

УЗ обработка высоковязкой нефти представляет собой физико-химический метод, направленный на радикальное изменение её реологических и оптических свойств за счет разрушения внутренней микрогетерогенной структуры. Исходное состояние нефти (рис. 3 а) характеризуется наличием протяжённых ассоциатов и агрегатов тяжелых компонентов – асфальтенов, смол и парафинов, которые формируют пространственную сетку, обуславливающую высокую вязкость. Помимо этого, в объёме нефти присутствуют диспергированные фазы в виде эмульгированных капель воды (водонефтяные глобулы) и микропузырьков растворенного газа. Такая сложная многокомпонентная система

обладает значительной оптической неоднородностью, что приводит к интенсивному рассеянию ИК-излучения и существенно затрудняет спектроскопический анализ.

Механизм воздействия (рис. 3 б) заключается в генерации в жидкости кавитационных пузырьков под действием ультразвука. Эти пузырьки, циклически образуясь и схлопываясь, создают зоны локального сверхвысокого давления и температуры, а также мощные гидродинамические микротоки. Эти процессы оказывают многостадийное воздействие на нефтяную среду. Во-первых, происходит механическое диспергирование — крупные асфальтено-смолистые и парафиновые агрегаты разрушаются до более мелких частиц, что ведёт к разрыву пространственной структуры и резкому снижению вязкости. Во-вторых, кавитационные силы способствуют коалесценции диспергированных капель воды и газовых пузырьков: мелкие частицы сливаются в более крупные, что впоследствии приводит к их быстрому расслоению и отделению от нефтяной фазы.

В результате УЗ обработки (рис. 3 в) система трансформируется в более однородную и мелкодисперсную. Это проявляется не только в улучшении реологических показателей, но и в кардинальном изменении оптических характеристик. Уменьшение размеров рассеивающих частиц и устранение дополнительных фаз (воды и газа) значительно снижает коэффициент рассеяния света в ИК диапазоне.

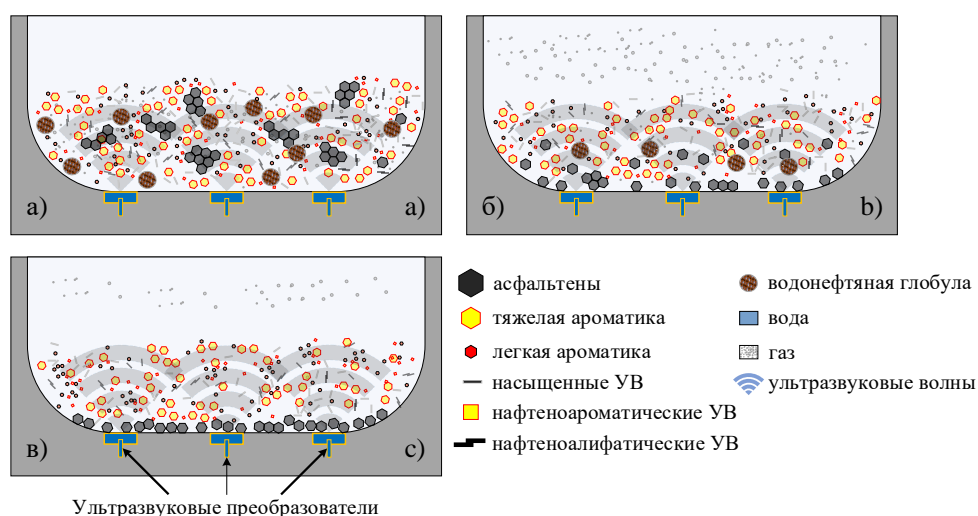


Рис. 3. Механизм воздействия ультразвука на высоковязкую нефть: а) нефть до обработки; б) нефть в первые минуты обработки; в) нефть в течение нескольких минут обработки

Fig. 3. The mechanism of ultrasound action on high-viscosity oil: a) oil before treatment; b) oil during the first minutes of treatment; c) oil within a few minutes of treatment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования показывают значительное повышение отношения «сигнал/шум» в ИК-спектрометрах после УЗ обработки образцов тяжелой нефти. Например, в работе [14] зафиксировали рост выходной интенсивности оптического сигнала на 51,36% по сравнению с необработанной нефтью после 15 минут ультразвука при начальной температуре образца смолистой нефти 15 °С. Это говорит о том, что нефтяная среда стала более однородной за счет снижения ξ .

Механизмы, за счет которых ультразвук снижает вязкость и разрушает неоднородную структуру нефти, подтверждаются независимыми измерениями. Так, Денгаев А.В. и др. провели экспериментальные исследования влияния ультразвука на свойства нефти, в результате чего выявили химическую конверсию фрагментов асфальтенов, которая привела к необратимому снижению вязкости [36].

Гао J. и др. провели экспериментальные исследования, в результате которых выяснено, что УЗ обработка эффективно снижает вязкость нефти, однако изменяет химический состав согласно полученным ИК-спектрограммам [37]. Тем не менее, одних лишь спектрограмм недостаточно для подтверждения данного вывода, поскольку наблюдаемое снижение оптической плотности нефти может быть обусловлено разрушением агломератов.

Романова и др. исследовали перспективность использования для разрушения водонефтяных эмульсий [26]. Авторы резюмируют, что разрушение 99% всех исследованных эмульсий достигается за счет применения ультразвука с добавлением в

образец нефти ацетон нанопорошковой суспензии.

Однако имеются и противоречивые результаты с точки зрения УЗО парафинистых нефтей:

Марфин Е.А. и др. провели исследование влияния ультразвука на нефти с различным содержанием парафинов, где отметили обратный эффект изменения динамической вязкости [38]. Также авторы подметили, что у образца, подвергнутого УЗ обработке, сильнее проявляются неньютоновские свойства.

Волкова Г.И. и др. выявили, что ультразвук приводит к увеличению вязкости парафинистой нефти, изменению удельной энергии разрыва дисперсной системы, температуры застывания и количества осадка, а также к изменению структуры осадка [39].

Лу и соавт. установили, что УЗ обработка тяжелой парафинистой нефти приводит к максимальному снижению вязкости на 87,2% и понижению температуры застывания на 4,8°C, что обусловлено разрушением структуры парафиновых кристаллов и асфальтеновых агрегатов [40].

Помимо снижения вязкости, ультразвук эффективно устраняет рассеивающие фазы – удаляет растворенный газ и разрушает водонефтяные глобулы. Например, Романова с соавт. добились почти полного разрушения стойкой водонефтяной эмульсии при обработке ультразвуком, выделив воду в отдельную фазу [26]. Таким образом, ультразвук выполняет комплексную пробоподготовку: дегазирует, дегидратирует и диспергирует нефть. С точки зрения предлагаемой модели (6), после оптимальной УЗ обработки параметр ξ заметно уменьшается, стремясь к нулю. Тогда можно предположить, что

$$\xi_1 = a \cdot \xi_0, \quad (7)$$

где ξ_1 – параметр фазового состояния частиц после УЗ обработки; ξ_0 – параметр фазового состояния частиц до УЗ обработки; a – коэффициент остаточной структурированности нефтяной среды. Параметр ξ можно контролировать через динамическую вязкость μ с помощью реологических температурных зависимостей, например, с использованием уравнения Аррениуса вида $\mu = f(T)$ или функции плотности вида $\rho = f(T)$, где T – температура нефти.

УЗ подготовка имеет преимущества по сравнению с химическим разбавлением и нагревом, так как не вносит посторонних примесей в нефть и может быть реализована непосредственно в линиях отбора проб или в процессе скважинного мониторинга. Например, можно создать проточный ИК-ячейку с УЗ преобразователем, через которую непрерывно проходит струйка нефти: ультразвук будет поддерживать её в диспергированном состоянии, а ИК-датчик – снимать спектр. Такой подход позволит в реальном времени контролировать изменения состава нефти при добыче тяжелой нефти с подачей растворителей или термовоздействием и будет способствовать надежности и снижению интенсивности отказов устройств на нефтеперекачивающих станциях [41, 42].

При этом УЗ обработка приобретает особую значимость в условиях Крайнего Севера, где низкие температуры приводят к интенсивной кристаллизации парафинов, формированию асфальтосмолопарафиновых отложений и, следовательно, резкому росту вязкости нефти [43, 44]. Ультразвук, обладая комплексом механизмов воздействия – кавитационное диспергирование, локальный нагрев, деструкция агрегатов – не только гомогенизирует холодную нефть, но и стимулирует более активное взаимодействие её компонентов с вводимыми депрессорными и дезагрегирующими присадками. Это позволяет в полевых или лабораторных условиях провести более адекватную и репрезентативную оценку влияния присадки на реологические и структурные свойства нефти до её масштабного применения в системе трубопроводного транспорта.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Выведенное уравнение (6) описывает совокупное ослабление ИК-луча в тяжелой нефти за счёт поглощения и дополнительных потерь, прямо связанных с реологией нефти через параметр ξ . Такая модель предсказывает нелинейную зависимость оптической плотности от концентрации компонентов нефти, особенно в областях сильного поглощения. В частности, для образцов высоковязкой нефти без специальной подготовки значение $\sigma_s(\lambda, \xi) \cdot l$ может быть сравнимо или превышать $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot l$, что приводит к сильным перепадам на спектрограмме. Модель объясняет, почему в экспериментах прямая калибровка по закону БЛБ часто не работает. Это связано с тем, что измеренная оптическая плотность включает значительное энергетическое слагаемое в виде рассеяния. Например, при попытке количественно определить содержание асфальтенов по интенсивности их характеристической полосы 1600 см⁻¹ в спектре нефти, стандартная калибровочная прямая даст заниженный наклон и смещение из-за различной степени

агрегации асфальтенов в разных пробах. Учет же σ_s через параллельное измерение вязкости μ или оценку мутности позволит скорректировать результаты. Практически это может быть реализовано так: одновременно с ИК-спектром измеряется коэффициент пропускания на некогерентном видимом свете, иными словами, показатель мутности или скорость распространения УЗ колебаний в образце, которые связаны с ξ – и затем по полученной эмпирической модели вносятся поправки в спектральный анализ.

Важно отметить, что предлагаемая модель требует экспериментального определения нескольких параметров: $\sigma_s(\lambda, \xi)$, K . Их нахождение возможно калибровкой на образцах, приведённых в однородное состояние. Однородности можно достигнуть посредством предварительного дегазирования, фильтрации или разбавления, что позволит добиться повышения прозрачности нефти.

Модель (6) также подразумевает пути к повышению линейности $Cl_a(\lambda)$. Минимизация σ_s стремлением к $\xi \rightarrow 0$ сделает зависимость близкой к классическому закону БЛБ. То есть в идеале нужно удалить из нефти все вторичные фазы и агрегаты. В лабораторных условиях этого добиваются, добавляя органические растворители (тетрахлорметан, толуол и пр.) для разбавления тяжелой нефти перед записью ИК-спектра. Добавки таких растворителей резко снижают вязкость и разрушают ассоциаты асфальтенов, переводя их в раствор – тем самым уменьшается ξ и нефть становится оптически более прозрачной. Однако, как отмечено в литературе, метод разбавления имеет существенные недостатки: используемые растворители (например, CCl_4 , CS_2) токсичны и пожароопасны, могут вступать в нежелательные реакции с нефтяными компонентами (хлорирование алканов с образованием HCl и тиолов), вызывать коррозию оборудования и менять исходный состав образца, снижая точность анализа [14]. При многократном использовании растворителей снижается надёжность и долговечность измерительной системы. Поэтому сегодня актуальны безреагентные методы подготовки проб.

Внедрение предложенной улучшенной модели БЛБ и УЗ пробоподготовки открывает новые возможности для контроля и исследования тяжелых нефтей. Прямой результат – получение более достоверных ИК-спектров, пригодных для количественного анализа. Это позволит, к примеру, по спектру сырой нефти оценивать её ключевые параметры: содержание смол, асфальтенов, парафинов, воды. Сегодня такие оценки требуют длительной лабораторной работы (осаждение асфальтенов, хроматографическое разделение и т.д.), тогда как ИК-спектрометрия могла бы дать быстрые результаты в полевых условиях. Учёт же реологических поправок, как предложено в нашей работе, может повысить точность подобных моделей, устранив вариабельность спектров, связанную не с составом, а с физическим состоянием образца. Практическая значимость предложенного подхода заключается в упрощении решения задач трубопроводного транспорта — повышении эксплуатационной безопасности, а также в обеспечении высокой надёжности и долговечности стали трубопровода за счёт предварительного анализа физико-химических свойств нефти и оптимизированного подбора присадок на основе ИК-спектроскопии. Ограничением предложенной модели является то, что она не детализирует спектральную форму рассеяния и интерференции. Тем не менее, введение параметра фазового состояния частиц существенно улучшает согласие модели с экспериментом. При необходимости модель можно расширить, добавив нелинейные члены, например, квадратичный по концентрации – для учета межмолекулярных взаимодействий на поглощении. В ряде работ предпринимались такие шаги. В работе [16] было введено понятие «квази-идеальных» смесей, где отклонения от закона БЛБ компенсируются в статистическом факторе при регрессионном анализе спектров. Наш подход проще с точки зрения физической интерпретации, где каждое слагаемое отвечает за конкретные потери энергии излучения.

Заключение (Conclusions)

Анализ высоковязких нефтей методами ИК-спектроскопии требует учета специфики этих сложных систем. Проведенное исследование показало, что классический закон БЛБ неприменим к тяжелым нефтям без модификации, поскольку игнорирует основные факторы, влияющие на прохождение света: присутствие дисперсных фаз (асфальтеновых агрегатов, парафиновых кристаллов, эмульгированной воды, газовых пузырьков) и связанные с ними эффекты рассеяния и отражения. Между тем, именно эти факторы определяются реологическими свойствами нефти – ее вязкостью, структурой, фазовым составом. Было установлено, что химический состав, обуславливающий вязкость нефти, одновременно определяет и ее оптическую плотность. На основе этого разработана расширенная модель закона БЛБ, в которую введён коэффициент σ_s ,

зависящий от параметров структуры нефти ξ . Модифицированный закон (6) значительно лучше описывает экспериментальные данные по ИК пропусканию тяжелой нефти и предсказывает нелинейные зависимости, наблюдаемые на практике. В частности, учёт рассеяния объясняет, почему разбавление или нагрев тяжелой нефти приводит к нелинейному росту пропускания – эти процессы снижают σ_s за счет разрушения агрегатов и тем самым приводят нефтяную среду к условиям применимости линейного закона.

Практическим воплощением подхода к повышению справедливости закона БЛБ для ИК-анализа может стать использование УЗ пробоподготовки. Ультразвук доказал свою эффективность в снижении вязкости тяжелой нефти за счет комплексного воздействия – дегазации, демульгирования и деструкции высокомолекулярных структур. Таким образом, ультразвук выступает альтернативой традиционному разбавлению растворителями.

Перспективами дальнейшего развития данного направления являются интеграция оптических и реологических методов анализа, устранение пробелов в УЗО парафинистых нефтей, создание комбинированных датчиков, которые одновременно измеряют спектр и вязкость и по совокупности сигналов вычисляют скорректированные концентрации компонентов нефти. Кроме того, целесообразно исследовать совместное применение ультразвука и химических методов. Это может быть реализовано через УЗ диспергирование нефти в присутствии малых доз высокоэффективных добавок по типу ПАВ. Такой синергетический подход, вероятно, позволит достичь практически полного приведения тяжелой нефти к оптической линейности среды без существенного изменения химического состава образца нефти. Полученные результаты вносят вклад в методическое обеспечение анализа тяжёлых нефтей и могут найти применение при разработке интеллектуальных систем контроля нефтепромысловых процессов, где экспресс-оценка свойств высоковязкой нефти имеет решающее значение для обеспечения надежности, долговечности оборудования и безопасности процессов.

Литература

1. Semenova T., Sokolov I. Theoretical Substantiation of Risk Assessment Directions in the Development of Fields with Hard-to-Recover Hydrocarbon Reserves // Resources. 2025. Vol. 14, N4. 64.
2. Дмитриев А.В., Шагеев А.Ф., Гильмутдинова Р.И. Оценка параметров внутрискважинного реактора для добычи высоковязкой нефти // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 187-196.
3. Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., Бикзинуров А.Р., и др. Исследование содержания непредельных углеводородов в трансформаторных маслах с помощью ИК спектроскопии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. №. 5. С. 3-19.
4. Филатов В.М., Растворова И.И., Журба Е.Д. Обзор радиоэлектронных волновых методов и приборов диагностики и мониторинга нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 12. С. 164–181.
5. Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., и др. Перестраиваемые диодные лазеры для аналитики и диагностики // Журнал аналитической химии. 2023. Т. 78. №. 10. С. 867-882.
6. Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М., Есипов И.Б. Ультразвуковое регулирование вязкоупругих свойств нефтяных дисперсных систем // Акустический журнал. 2023. Т. 69. №. 3. С. 322-329.
7. Raupov I., Burkhanov R., Lutfullin A., et al. Experience in the application of hydrocarbon optical studies in oil field development // Energies. 2022. Vol. 15, N10. 3626.
8. Santos F.D., Vianna S.G., Cunha P.H., et al. Characterization of crude oils with a portable NIR spectrometer // Microchemical Journal. 2022. Vol. 181. 107696.
9. Xu S., Xu Z., Zheng J., et al. Where does the crude oil originate? The role of near-infrared spectroscopy in accurate source detection // Memetic Computing. 2024. Vol. 16, N3. pp. 429-443.
10. Yang S.B., Moreira J., Li Z. Predicting crude oil properties using fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and data-driven methods // Digital Chemical Engineering. 2022. Vol. 3. 100031.
11. Moro M.K., de Castro E.V., Romão W., Filgueiras P.R. Data fusion applied in near and mid infrared spectroscopy for crude oil classification // Fuel. 2023. Vol. 340. 127580.

12. Asemani M., Rabbani A.R. Detailed FTIR spectroscopy characterization of crude oil extracted asphaltenes: Curve resolve of overlapping bands // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 185. 106618.
13. Mokari A., Guo S., Bocklitz T. Exploring the steps of infrared (IR) spectral analysis: Pre-processing, (classical) data modelling, and deep learning // *Molecules*. 2023. Vol. 28, N19. 6886.
14. Rastvorova I.I., Filatov V.M., Vilkov S.A. Reduction of Optical Density in Highly Viscous Oils through Ultrasonic Treatment within The Infrared Wavelength Range // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026. Vol. 39, N8. pp. 1865-1877.
15. Sargazi M., Hashemi S.H., Kaykhahi M. Modern sample preparation techniques: A brief introduction. *Sample preparation techniques for chemical analysis*. Ch. 2. Rijeka, Croatia: IntechOpen; 2021.
16. Mayerhöfer T.G., Pahlow S., Popp J. Understanding the Limits of the Bouguer–Beer–Lambert Law // *Spectroscopy*. 2023. Vol. 38, N8. pp. 29–30.
17. Загнитько А.В., Н.П. Зарецкий Н.П., Меньшиков Л.И., П.Л. Меньшико П.Л. О применимости закона Бугера–Ламберта–Бера для оценки коэффициента поглощения лучей света в облаке диспергированной жидкости // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. №. 11. С. 944-947.
18. Johny J., Amos S., Prabhu R. Optical Fibre-Based Sensors for Oil and Gas Applications // *Sensors*. 2021. Vol. 21, N18. 6047.
19. Beloglazov I, Morenov V, Leusheva E. Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2021. Vol. 30, N4. pp. 43-51.
20. Fakher S., Ahdaya M., Elturki M., Imqam A. Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020. Vol. 10. pp. 1183–1200.
21. Shi B., Hong J., Wang Z., et al. Treatment of paraffin deposition behavior in gas-condensate wells with chemical inhibitors // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024. Vol. 14. pp. 535–553.
22. Lin Q., Deng L., Dong G., et al. aRDG Analysis of Asphaltene Molecular Viscosity and Molecular Interaction Based on Non-Equilibrium Molecular Dynamics Simulation // *Materials*. 2022. Vol. 15, N24. 8771.
23. Hashem H.H., Kikhavani T., Moradkhani M.A. Experimental study and machine learning modeling of water removal efficiency from crude oil using demulsifier // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 9187.
24. Huang J., Ran X., Sun L., et al. Recent advances in membrane technologies applied in oil–water separation // *Discover Nano*. 2024. Vol. 19. 66.
25. Lyu L., Zhang J., Xu C. Modeling Study on Oil Particle Filtration Performance of a Composite Coalescing Filter // *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. 854913.
26. Romanova Y.N., Maryutina T.A., Musina N.S., Spivakov B.Ya. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 209. 109977.
27. Kaivosoja J., Sirviö K., Nuortila C., Niemi S. Effects of Fuel Hydrochloric Acid Contamination on Selected Metals // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, N5. 776.
28. Li S., Wu J., Wang Y., et al. Isolation and characterization of thiols in petroleum using Ag⁺-silica solid phase extraction followed by gas chromatography-mass spectrometry and high-resolution mass spectrometry // *Fuel*. 2024. Vol. 363. 130946.
29. Wallington T., Pivesso B., Lira A., et al. CH₃Cl, CH₂Cl₂, CHCl₃, and CCl₄: Infrared spectra, radiative efficiencies, and global warming potentials // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2016. Vol. 174. pp. 56-64.
30. Zhong M., Niu Z., Fan J., et al. Establishing the relationship between heavy oil viscosity and molecular markers using an enhanced neural network model // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 33289.
31. Guan L., Deng H., Yao L., et al. Measurement of mid-infrared spectroscopic parameters of carbon disulfide based on tunable diode laser absorption spectroscopy // *Acta Physica Sinica*. 2019. Vol. 68, N8. 20182140.
32. Пивоварова Н., Татжиков А. Состав и строение нефтяных дисперсных систем // *Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность*. 2023. №. 4. С. 14-27.

33. Khazaal, S.H., Ibrahim R., Mowea W. Viscosity Reduction and Flow Ability Enhancement of Heavy Crude Oil Using Nano Biomaterial Additive and Microwave Irradiation // Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 2025. 26 с.

34. Wu H., Liu T., Xu X., Yang J. Enhanced Viscosity Reduction of Heavy Oil by a Synthesized Extended Anionic Surfactant: Mechanistic Exploration and Performance Evaluation // ACS Omega. – 2025. Vol. 10, N42. pp. 49477–49489.

35. AlizadehShahla S., TaLakshminarayanan A., RayAjay R.S. Application of artificial neural network for prediction of 10 crude oil properties // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2023. Vol. 101, N11. pp. 6203-6214. DOI: 10.1002/cjce.24938

36. Baimukhametov G., Dengaev A., Safiullina E., et al. Relaxation Process in Crude Oil after Ultrasonic Treatment // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37, N5. pp. 896-903.

37. Gao J., Li C., Xu D., et al. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 81, N5. 105842.

38. Марфин Е.А., Галимзянова А.Р., Гатауллин Р.Н., Натфуллин Р.А. Влияние ультразвуковой обработки на реологические свойства парафинистой нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14. №. 1. С. 74-83.

39. Volkova G., Zubarev D., Kadychagov P. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties and Composition of High-Wax Crude Oil and Its Precipitates // Petroleum Chemistry. 2024. Vol. 64. pp. 540-547.

40. Shiyi Lv., Zhang R., Guo Z., et al. Воздействие ультразвука на вязкость тяжелой нефти // Нефтехимия. 2020. Т. 60. №. 5. С. 607-611.

41. Петров А.Р., Грачева Е.И. Исследование надежности и эффективности электрических аппаратов систем внутрицехового электроснабжения // Электричество. 2025. №. 3. С. 57-65.

42. Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. №. 3. С. 38-52.

43. Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 5. С. 166-178.

44. Коробов Г.Ю., Парфенов Д.В., Нгуен В.Т. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и факторы интенсивности их формирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. №. 4. С. 103–116.

Авторы публикации

Филатов Владислав Максимович – аспирант Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-1902-5526>. Email: vladislav-fil01@mail.ru.

Растворова Ирина Ивановна – д-р техн. наук, доцент, член-корреспондент АЭН РФ, заведующая кафедрой электронных систем, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1196-7463>. Email: rastvorova@mail.ru.

References

1. Semenova T., Sokolov I. Theoretical Substantiation of Risk Assessment Directions in the Development of Fields with Hard-to-Recover Hydrocarbon Reserves. Resources. 2025;14(4):64. doi: 10.3390/resources14040064

2. Dmitriev A.V., Shageev A.F., Gilmutdinova R.I. Evaluation of downhole reactor parameters for high viscosity oil production. Power engineering: research, equipment, technology. 2025;27(2):187-196. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-187-196

3. Garifullin M.Sh., Slobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Investigation of the content of unsaturated hydrocarbons in transformer oils using IR spectroscopy. Power engineering: research, equipment, technology. 2023;25(5):3-19. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19

4. Filatov V.M., Rastvorova I.I., Zhurba E.D. Review of radio-electronic wave techniques and devices for oil diagnostics and monitoring. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025;336(12):164–181. (In Russ.) doi: 10.18799/24131830/2025/12/4945
5. Bolshov M.A., Kuritsyn Yu.A., Liger V.V., et al. *Perestraivaemye diodnye lazery dlya analitiki i diagnostiki. Zhurnal analiticheskoy himii*. 2023;78(10):867-882. (In Russ.). doi: 10.31857/S0044450223100055
6. Mullakaev M.S., Mullakaev R.M., Esipov I.B. Ultrasound Control of Viscoelastic Properties of Petroleum Dispersion Systems. *Acoustical Physics*. 2023;69(3):322-329. (In Russ.). doi: 10.31857/S0320791922600408
7. Raupov I., Burkhanov R., Lutfullin A., et al. Experience in the application of hydrocarbon optical studies in oil field development. *Energies*. 2022;15(10):3626. doi: 10.3390/en15103626
8. Santos F.D., Vianna S.G., Cunha P.H., et al. Characterization of crude oils with a portable NIR spectrometer. *Microchemical Journal*. 2022;181:107696. doi: 10.1016/j.microc.2022.107696
9. Xu S., Xu Z., Zheng J., et al. Where does the crude oil originate? The role of near-infrared spectroscopy in accurate source detection. *Memetic Computing*. 2024;16(3):429-443. doi: 10.1007/s12293-024-00425-3
10. Yang S.B., Moreira J., Li Z. Predicting crude oil properties using fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and data-driven methods. *Digital Chemical Engineering*. 2022;3:100031. doi: 10.1016/j.dche.2022.100031
11. Moro M.K., de Castro E.V., Romão W., Filgueiras P.R. Data fusion applied in near and mid infrared spectroscopy for crude oil classification. *Fuel*. 2023;340:127580. doi: 10.1016/j.fuel.2023.127580
12. Asemani M., Rabbani A.R. Detailed FTIR spectroscopy characterization of crude oil extracted asphaltenes: Curve resolve of overlapping bands. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;185:106618. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106618
13. Mokari A., Guo S., Bocklitz T. Exploring the steps of infrared (IR) spectral analysis: Pre-processing, (classical) data modelling, and deep learning. *Molecules*. 2023;28(19):6886. doi: 10.3390/molecules28196886
14. Rastvorova I.I., Filatov V.M., Vilkov S.A. Reduction of Optical Density in Highly Viscous Oils through Ultrasonic Treatment within The Infrared Wavelength Range. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(8):1865-1877. doi: 10.5829/ije.2026.39.08b.08
15. Sargazi M., Hashemi S.H., Kaykhani M. Modern sample preparation techniques: A brief introduction. *Sample preparation techniques for chemical analysis. Ch. 2. Rijeka, Croatia: IntechOpen*; 2021. doi: 10.5772/intechopen.100715
16. Mayerhöfer T.G., Pahlow S., Popp J. Understanding the Limits of the Bouguer–Beer–Lambert Law. *Spectroscopy*. 2023;38(8):29–30.
17. Zagnitko A.V., Zaretsky N.P., Menshikov L.I., Menshikov P.L. On the applicability of the Beer-Lambert-Bouguer law for estimating the absorption coefficient of light rays in a cloud of dispersed liquid. *Optika atmosfery i okeana*. 2022;35(11):944-947. (In Russ.). doi: 10.15372/AOO20221110
18. Johnny J., Amos S., Prabhu R. Optical Fibre-Based Sensors for Oil and Gas Applications. *Sensors*. 2021;21(18):6047. doi: 10.3390/s21186047
19. Beloglazov I, Morenov V, Leusheva E. Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2021;30(4):43-51. doi: 10.1016/j.ejpe.2021.11.001
20. Fakher S., Ahdaya M., Elturki M., Imqam A. Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10:1183–1200. doi: 10.1007/s13202-019-00811-5
21. Shi B., Hong J., Wang Z., et al. Treatment of paraffin deposition behavior in gas-condensate wells with chemical inhibitors. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2024;14:535–553. doi: 10.1007/s13202-023-01716-0
22. Lin Q., Deng L., Dong G., et al. aRDG Analysis of Asphaltene Molecular Viscosity and Molecular Interaction Based on Non-Equilibrium Molecular Dynamics Simulation. *Materials*. 2022;15(24):8771. doi: 10.3390/ma15248771
23. Hashem H.H., Kikhavani T., Moradkhani M.A. Experimental study and machine learning modeling of water removal efficiency from crude oil using demulsifier. *Scientific Reports*. 2024;14:9187. doi: 10.1038/s41598-024-59963-y

24. Huang J., Ran X., Sun L., et al. Recent advances in membrane technologies applied in oil–water separation. *Discover Nano*. 2024;19:66. doi: 10.1186/s11671-024-04012-w
25. Lyu L., Zhang J., Xu C. Modeling Study on Oil Particle Filtration Performance of a Composite Coalescing Filter. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10:854913. doi: 10.3389/fenrg.2022.854913
26. Romanova Y.N., Maryutina T.A., Musina N.S., Spivakov B.Ya. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;209:109977. doi: 10.1016/j.petrol.2021.109977
27. Kaivosoja J., Sirviö K., Nuortila C., Niemi S. Effects of Fuel Hydrochloric Acid Contamination on Selected Metals. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(5):776. doi: 10.3390/jmse12050776
28. Li S., Wu J., Wang Y., et al. Isolation and characterization of thiols in petroleum using Ag⁺-silica solid phase extraction followed by gas chromatography-mass spectrometry and high-resolution mass spectrometry. *Fuel*. 2024;363:130946. doi: 10.1016/j.fuel.2024.130946
29. Wallington T., Pivesso B., Lira A., et al. CH₃Cl, CH₂Cl₂, CHCl₃, and CCl₄: Infrared spectra, radiative efficiencies, and global warming potentials. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2016;174:56-64. doi: 10.1016/j.jqsrt.2016.01.029
30. Zhong M., Niu Z., Fan J., et al. Establishing the relationship between heavy oil viscosity and molecular markers using an enhanced neural network model. *Scientific Reports*. 2025;15:33289. doi: 10.1038/s41598-025-18561-2
31. Guan L., Deng H., Yao L., et al. Measurement of mid-infrared spectroscopic parameters of carbon disulfide based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Acta Physica Sinica*. 2019;68(8):20182140. doi: 10.7498/aps.68.20182140
32. Pivovarova N.A., Tazhikov A.D. Composition and structure of oil dispersed systems. *Oil and Gas Technologies and Environmental Safety*. 2023;4:14-27. (In Russ.). doi: 10.24143/1812-9498-2023-4-14-27
33. Khazaal, S.H., Ibrahim R., Mowea W. Viscosity Reduction and Flow Ability Enhancement of Heavy Crude Oil Using Nano Biomaterial Additive and Microwave Irradiation. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2025:26. doi: 10.22059/jchpe.2025.398861.1649
34. Wu H., Liu T., Xu X., Yang J. Enhanced Viscosity Reduction of Heavy Oil by a Synthesized Extended Anionic Surfactant: Mechanistic Exploration and Performance Evaluation. *ACS Omega*. 2025;10(42):49477–49489. doi: 10.1021/acsomega.5c03136
35. AlizadehShahla S., TaLakshminarayanan A., RayAjay R.S. Application of artificial neural network for prediction of 10 crude oil properties. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023, 101(11):6203-6214. doi: 10.1002/cjce.24938
36. Baimukhametov G., Dengaev A., Safiullina E., et al. Relaxation Process in Crude Oil after Ultrasonic Treatment. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024;37(5):896-903. doi: 10.5829/ije.2024.37.05b.08
37. Gao J., Li C., Xu D., et al. The mechanism of ultrasonic irradiation effect on viscosity variations of heavy crude oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;81(5):105842. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105842
38. Marfin E.A., Galimzyanova A.R., Gataullin R.N., Natfullin R.A. Effect of ultrasonic treatment on rheological properties of paraffinic oil. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024;14(1):74-83. (In Russ.). doi: 10.28999/2541-9595-2024-14-1-74-83
39. Volkova G., Zubarev D., Kadychagov P. Effect of Ultrasonic Treatment on the Properties and Composition of High-Wax Crude Oil and Its Precipitates. *Petroleum Chemistry*. 2024;64:540-547. doi: 10.1134/S0965544124020026
40. Shiyi Lv., Zhang R., Guo Z., et al. Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic. *Petroleum Chemistry*. 2020;60(5):607-611. (In Russ.). doi: 10.31857/S0028242120050196
41. Petrov A.R., Gracheva E.I. Study of Reliability and Efficiency of Workshop Power Supply System Electrical Apparatuses. *Elektrichestvo*. 2025;3:57-65. (In Russ.). doi: 10.24160/0013-5380-2025-3-57-65
42. Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of in house power supply taking into account the main influencing factors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(3):38-52. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52

43. Safiullin B.R., Kozelkova V.O., Kashaev R.S., Kozelkov O.V. Refining of the oil from asphaltene-resins and paraffins. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(5):166-178. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178

44. Korobov G.YU., Parfenov D.V., Nguyen T.V. Mechanisms of the formation of asphalt-resin and paraffin deposits and factors influencing their intensity. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023;334(4):103–116. doi: 10.18799/24131830/2023/4/3940

Authors of the publication

Vladislav M. Filatov - Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1902-5526>. vladislav-fil01@mail.ru.

Irina I. Rastvorova - Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1196-7463>. rastvorova@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **19.01.2026 г.**

Отредактировано **13.02.2026 г.**

Принято **17.03.2026 г.**