

УДК 621.89.017:621.892.5:665.765
DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-45-56

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛОС ИК-СПЕКТРОВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК (ОБЗОР)

А. В. ИВАХНИК, В. И. ЖОРНИК

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Проведено исследование возможностей инфракрасной спектроскопии для анализа состава и структуры пластичных смазок. Методом ИК-спектроскопии изучены характерные спектральные особенности основных компонентов смазочных материалов: базовых масел различного происхождения, загустителей и функциональных присадок. Установлены диагностически значимые спектральные маркеры для каждого типа компонентов пластичных смазок. Отражена эффективность метода для решения практических задач: контроля качества, выявления фальсификатов, мониторинга старения и оптимизации составов. Представлены результаты исследования, демонстрирующие высокую информативность и надежность ИК-спектроскопии как инструмента для научных исследований и производственного контроля в области разработки и применения пластичных смазок. Отмечено, что полученные данные могут быть использованы для создания спектральных баз данных пластичных смазок и разработки автоматизированных систем анализа.

Ключевые слова: ИК-спектроскопия, пластичные смазки, спектральный анализ, волновые числа, характеристические полосы, смазочные материалы.

Для цитирования. Ивахник, А. В. Аспекты применения инфракрасной спектроскопии для идентификации основных характеристических полос ИК-спектров пластичных смазок (обзор) / А. В. Ивахник, В. И. Жорник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 45–56. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-45-56

ASPECTS OF INFRARED SPECTROSCOPY APPLICATION FOR THE IDENTIFICATION OF THE MAIN CHARACTERISTIC BANDS OF THE IR SPECTRA OF GREASES (REVIEW)

A. V. IVAKHNIK, V. I. ZHORNIK

State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk

A study was conducted to explore the potential of infrared spectroscopy for analyzing the composition and structure of greases. IR spectroscopy was used to study the characteristic spectral features of the main components of lubricants: base oils of various origins, thickeners, and functional additives. Diagnostically significant spectral markers were identified for each type of grease component. The effectiveness of the method for solving practical problems is demonstrated: quality control, counterfeit detection, aging monitoring, and composition optimization. The study results are presented, demonstrating the high information content and reliability of IR spectroscopy as a tool for scientific research and industrial control in the field of grease development and application. It is noted that the obtained data can be used to create spectral databases of greases and develop automated analysis systems.

Keywords: IR spectroscopy, greases, spectral analysis, wave numbers, characteristic bands, lubricant.

For citation. Ivakhnik A. V., Zhornik V. I. Aspects of infrared spectroscopy application for the identification of the main characteristic bands of the IR spectra of greases (review). *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 45–56 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-45-56

Введение

Пластичные смазки играют ключевую роль в современной технике и промышленности, обеспечивая снижение трения, защиту от износа и коррозии, а также герметизацию узлов трения. Они активно применяются в автомобильной промышленности, авиации, энергетике и других отраслях, где требуется долговечная и надежная работа механизмов. Однако состав смазок сложен и включает в себя базовые масла, загустители и различные присадки, которые определяют их эксплуатационные свойства.

Контроль качества и анализ состава смазок являются важными задачами для обеспечения их эффективности и безопасности. Один из наиболее информативных методов исследования состава и структуры материалов – инфракрасная (ИК) спектроскопия. Данный метод позволяет идентифицировать функциональные группы и химические связи в молекулах, что делает его незаменимым инструментом для анализа пластичных смазок.

ИК-спектроскопия как метод, основанный на поглощении инфракрасного излучения молекулами, дает возможность идентифицировать функциональные группы и химические связи, которые проявляются в виде характерных полос поглощения в определенных диапазонах волновых чисел. Эти полосы представляют собой уникальные «отпечатки» химических соединений, что делает ИК-спектроскопию мощным инструментом для анализа состава смазок [1].

Особое внимание уделено интерпретации спектральных данных, а также рассмотрению особенностей спектров, связанных с различными типами базовых масел (минеральных, синтетических, растительных), загустителей и функциональных присадок, улучшающих некоторые физико-химические свойства пластичных смазок.

Таким образом, представленная работа направлена на углубление понимания взаимосвязи между ИК-спектрами и составом пластичных смазок, что может служить основой для дальнейших исследований в области разработки, анализа и контроля качества смазочных материалов.

Цель настоящей статьи заключается в детальном рассмотрении основных характеристических полос в ИК-спектрах пластичных смазок, их интерпретации и связи с химическим составом и структурой смазочных материалов.

Теоретические основы инфракрасной спектроскопии

Инфракрасная спектроскопия – это аналитический метод, основанный на взаимодействии инфракрасного излучения с веществом, приводящем к возбуждению колебательных и вращательных уровней энергии молекул. Этот метод широко используется для изучения химического состава, структуры и взаимодействий в органических и неорганических соединениях, включая пластичные смазки.

ИК-спектроскопия основана на поглощении инфракрасного излучения в диапазоне длин волн от 0,7 до 1000 мкм (или волновых чисел от 12500 до 10 см⁻¹). Когда молекула поглощает ИК-излучение, это приводит к изменению ее колебательной и вращательной энергии. Каждая химическая связь в молекуле имеет характерные частоты колебаний, которые зависят от массы атомов, силы связи и геометрии молекулы. Эти частоты проявляются в ИК-спектрах в виде полос поглощения, которые являются уникальными для конкретных функциональных групп и химических связей [1].

В ИК-спектроскопии выделяют два основных типа молекулярных колебаний: валентные и деформационные колебания.

Валентные колебания (растяжение связей) происходят при изменении длины химической связи. Данные колебания обычно проявляются в области высоких волновых чисел ($4000\text{--}1700\text{ см}^{-1}$). Приведем примеры таких колебаний: колебания связей C–H ($2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$); O–H ($3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$); C=O ($1700\text{--}1750\text{ см}^{-1}$) [2].

Деформационные колебания (изгиб связей) происходят при изменении угла между связями. Такие колебания наблюдаются в области низких волновых чисел ($1700\text{--}400\text{ см}^{-1}$). Представим следующие примеры: колебания CH_2 ($1450\text{--}1470\text{ см}^{-1}$); CH_3 ($1375\text{--}1385\text{ см}^{-1}$); деформационные колебания воды ($1600\text{--}1640\text{ см}^{-1}$) [2].

Также ИК-спектр условно разделяют на три области: ближняя область (NIR, $12800\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) – характеризуется слабыми полосами поглощения, связанными с обертонами и комбинационными колебаниями; средняя область (MIR, $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$) – наиболее информативная область для анализа органических соединений, которая включает основные характеристические полосы, относящиеся к валентным и деформационным колебаниям; дальняя область (FIR, $400\text{--}10\text{ см}^{-1}$) – используется для изучения низкочастотных колебаний, таких как вращение молекул и колебания кристаллической решетки [2].

ИК-спектроскопия пластичных смазок позволяет идентифицировать базовые масла (минеральные, синтетические, растительные) по характерным полосам C–H, C=O и др. Ее применяют, чтобы определять типы загустителей (мыла, комплексные мыла, неорганические загустители) по полосам, связанным с карбоксильными группами (COO^-), анализировать присадки по специфическим полосам, таким как фосфаты (P=O), сульфаты (S=O) и др. [3].

Состав пластичных смазок и их отражение в ИК-спектрах

Пластичные смазки представляют собой сложные многокомпонентные системы, состоящие из дисперсионной среды – базовых масел, дисперсной фазы – загустителей, функциональных присадок. Каждый из этих компонентов вносит свой вклад в ИК-спектр, что дает возможность использовать спектроскопию для анализа состава и структуры смазок.

ИК-спектры дисперсионной среды

Базовые масла являются основой смазок и могут быть минеральными (масла I и II групп API), синтетическими (масла III–V групп API) или растительными.

Масла первой группы (минеральные масла) получают путем прямой перегонки нефти и селективной очистки. Их ИК-спектры характеризуются следующими особенностями (рис. 1, ИК-спектр № 1) [4, 5]:

- сильные полосы в области $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$, связанные с валентными колебаниями C–H (CH_3 , CH_2);
- низкоинтенсивные полосы в области $1590\text{--}1620\text{ см}^{-1}$, указывающие на содержащиеся ароматические соединения и азотосодержащие соединения;
- полосы в областях $1430\text{--}1480\text{ см}^{-1}$ и $1360\text{--}1385\text{ см}^{-1}$, соответствующие деформационным колебаниям CH_2 и CH_3 ;
- полосы в областях $1130\text{--}1180\text{ см}^{-1}$, $790\text{--}860\text{ см}^{-1}$, свидетельствующие о содержащихся сернистых соединениях;
- полосы в области $710\text{--}740\text{ см}^{-1}$, характерные для деформационных колебаний CH_2 .

Масла второй группы (гидроочищенные минеральные масла) подвергаются более глубокой обработке, включая гидроочистку, что приводит к удалению нежелательных примесей (соединений серы и азота, ароматических соединений). Их ИК-спектры ана-

логичны ИК-спектрам масел первой группы, однако полосы в областях $1590\text{--}1620\text{ см}^{-1}$, $1130\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ и $790\text{--}860\text{ см}^{-1}$ будут иметь меньшую интенсивность, что связано с частичным удалением соединений серы, азота и ароматических соединений (рис. 1, ИК-спектр № 2) [4, 5].

Гидрокрекинговые масла (масла третьей группы) получают путем глубокой переработки нефти водородом с использованием катализаторов. Данный метод очистки ведет к разрыву длинных углеводородных цепей и насыщению ароматических соединений. Их полосы в областях $1590\text{--}1620\text{ см}^{-1}$, $1130\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ и $790\text{--}860\text{ см}^{-1}$ должны либо отсутствовать, либо иметь следовой характер (рис. 1, ИК-спектр № 3) [4, 5].

Полиальфаолефины (ПАО) или масла четвертой группы – это синтетические масла, получаемые путем полимеризации альфа-олефинов. Так как данный тип масел является синтезированным, то в ПАО маслах не могут присутствовать другие соединения кроме углеводородов. При этом полосы в области $710\text{--}740\text{ см}^{-1}$ должны быть значительно интенсивнее, чем в маслах третьей группы, так как ПАО масла состоят преимущественно из линейных или слаборазветвленных углеводородов с длинными цепями (рис. 1, ИК-спектр № 4) [4].

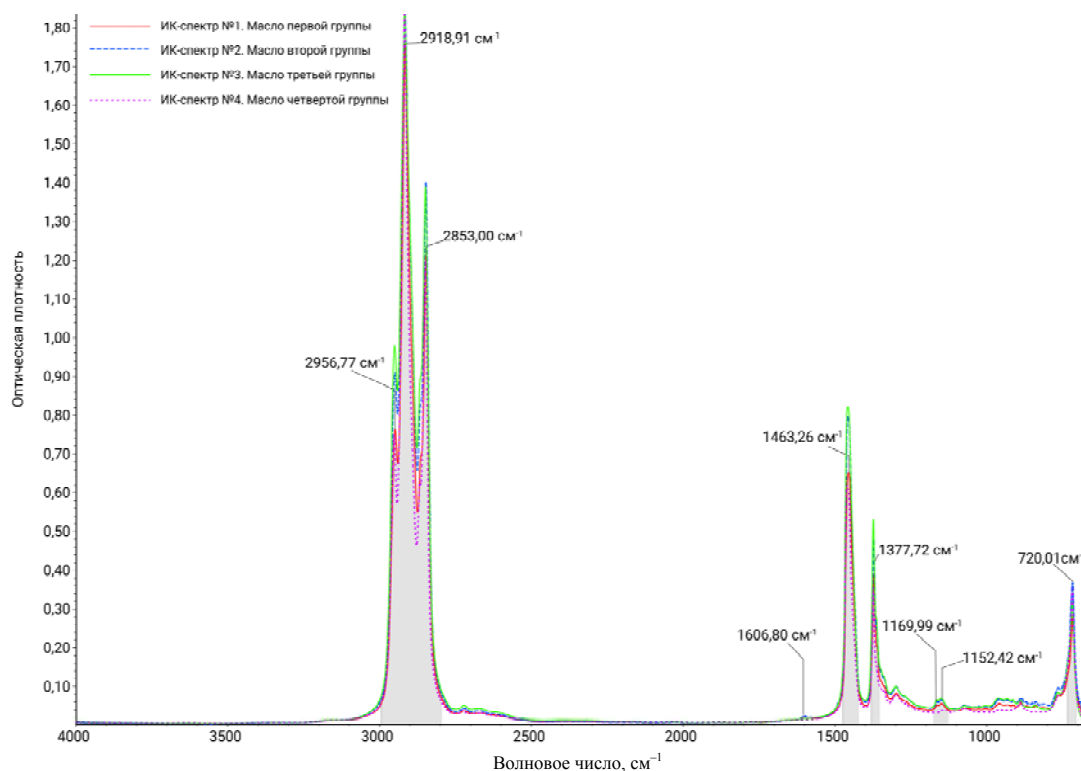


Рис. 1. ИК-спектры базовых масел 1–4 групп в области $600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$

Сложные эфиры (эстеры) – это соединения, образующиеся в результате реакции спиртов с карбоновыми кислотами и являющиеся маслами пятой группы. В качестве масел используются сложные эфиры различных типов, включая диэфиры, полиолэфиры и сложные эфиры ароматических кислот (рис. 2, ИК-спектр № 5) [6].

Полоса в области $1700\text{--}1760\text{ см}^{-1}$ – одна из наиболее интенсивных и характерных полос в спектрах эстеров. Она связана с карбонильной группой (C=O) сложных эфиров. Положение полосы может немного смещаться в зависимости от типа эстера. Для алифатических эстеров полоса обычно находится в области около $1735\text{--}1740\text{ см}^{-1}$. Для ароматических эстеров полоса может смещаться в сторону более низких волновых чисел (около $1710\text{--}1720\text{ см}^{-1}$) из-за сопряжения с ароматическим кольцом [6, 7].

Полосы в области $1000\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ (C-O) можно отнести к валентным колебаниям C-O в сложноэфирных группах. Если эстеры содержат ароматические группы, в области $700\text{--}900\text{ см}^{-1}$ могут наблюдаться полосы, связанные с ароматическими колебаниями [6].

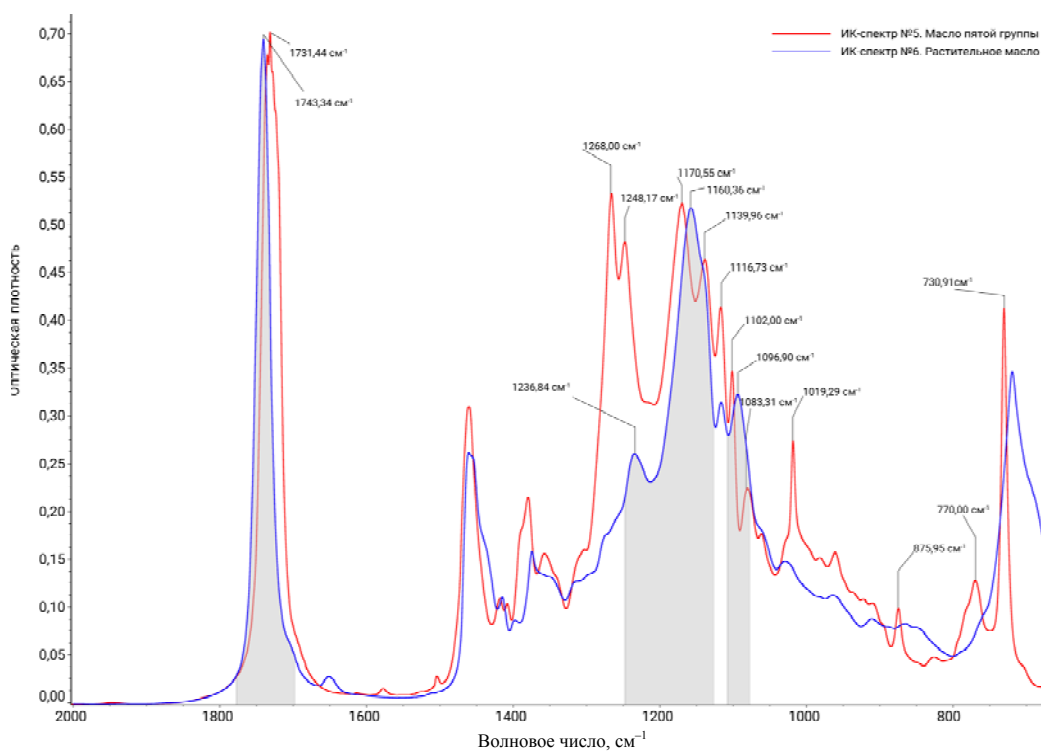


Рис. 2. ИК-спектр масла пятой группы (сложного эфира) и растительного масла в области $600\text{--}2000\text{ см}^{-1}$

Растительные масла состоят преимущественно из триглицеридов – сложных эфиров глицерина и жирных кислот. Их ИК-спектры имеют характерные полосы, которые соответствуют функциональным группам, присутствующим в триглицеридах. Полосы в области $1700\text{--}1780\text{ см}^{-1}$ согласуются с карбонильной группой (C=O) сложных эфиров, полосы в области $1130\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ – с валентными колебаниями C-O в сложноэфирных группах (O-C=O). Они являются одними из наиболее интенсивных в спектрах растительных масел и характерны для триглицеридов. Полосы в области $1080\text{--}111\text{ см}^{-1}$ обусловлены C-C колебаниями в углеводородных цепях. Они менее интенсивны, чем в области $1700\text{--}1780\text{ см}^{-1}$, но также важны для анализа структуры масла (рис. 2, ИК-спектр № 6) [4].

ИК-спектры дисперсной фазы

Загустители определяют структуру и физические свойства смазки и могут быть мыльными, неорганическими и смешанными. ИК-спектры смазок, изготовленных на неорганических загустителях, зачастую проявляют характерные полосы поглощения в дальней инфракрасной области (FIR, ниже 400 см^{-1}) за пределами области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$. Также полосы, связанные с базовым маслом, могут маскировать слабые полосы неорганических загустителей, что затрудняет их идентификацию. Однако некоторые неорганические соединения, используемые в качестве загустителей в пластичных смазках, все же могут проявлять полосы в средней ИК-области (MIR, $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$), особенно, если они содержат функциональные группы, такие как гидроксильные (OH), карбонатные (CO_3^{2-}) или силикатные (SiO_4^{4-}) [8].

В отличие от неорганических загустителей, которые часто проявляют слабые или нечеткие полосы в области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, ИК-спектры мыльных загустителей имеют четкие и интенсивные полосы, относящиеся к карбоксилатным группам, в области $1550\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ (асимметричные колебания COO^-). Эти полосы позволяют не только определить наличие мыльного загустителя, но и различить тип металла (литий, кальций и др.) по их положению и форме. Таким образом, ИК-спектры мыльных загустителей более информативны и удобны для анализа по сравнению с неорганическими загустителями, которые часто требуют использования дальней ИК-области (FIR) для получения значимых данных [9].

Так, в смазках на основе 12-гидроксистеарата лития наблюдаются ярко выраженные характеристические полосы в областях $1570\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ и $1550\text{--}1565\text{ см}^{-1}$ и менее выраженные – в области $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, вызванные колебаниями связанной ОН-группы в 12-гидроксистеариновой кислоте (рис. 3, ИК-спектр № 7) [9, 10].

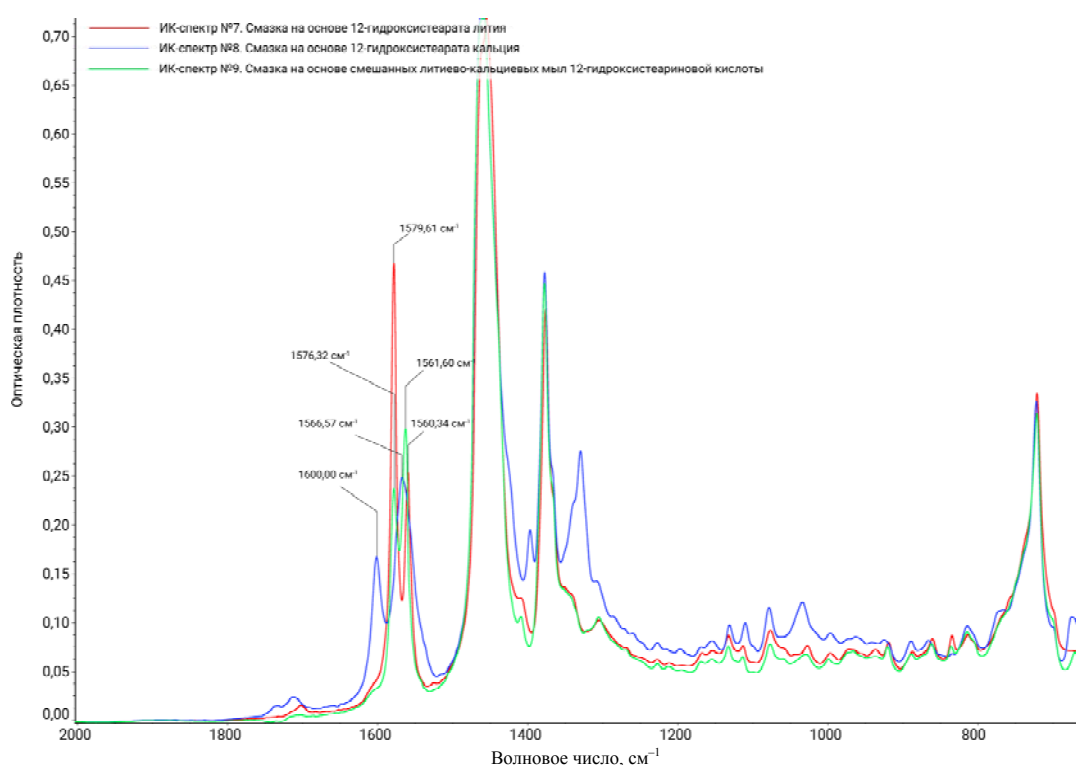


Рис. 3. ИК-спектры в области $600\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ смазки на основе 12-гидроксистеарата лития (№ 7), смазки на основе 12-гидроксистеарата кальция (№ 8), смазки на основе смешанных литиево-кальциевых мыл 12-гидроксистеариновой кислоты (№ 9)

В смазках на основе 12-гидроксистеарата кальция характеристические полосы смещены относительно полос 12-гидроксистеарата лития и охватывают более широкий диапазон волновых чисел, находясь в областях $1590\text{--}1610\text{ см}^{-1}$ и $1545\text{--}1580\text{ см}^{-1}$ (рис. 3, ИК-спектр № 8) [9].

Смазки на основе смешанных литиево-кальциевых мыл 12-гидроксистеариновой кислоты в зависимости от соотношения могут иметь разный характер ИК-спектра. На рис. 3 приведен ИК-спектр № 9 смазки на основе 12-гидроксистеаратов лития и кальция в соотношении 1 : 1 по массе, характеристические полосы которой находятся в областях $1570\text{--}1585\text{ см}^{-1}$ и $1550\text{--}1570\text{ см}^{-1}$ [9].

На положение характеристических полос загустителей также влияют жирные кислоты, на которых они изготовлены. Так, гидратированные смазки на основе стеарата кальция имеют характеристические полосы в областях $1560\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ и $1525\text{--}1555\text{ см}^{-1}$ (рис. 4, ИК-спектр № 10). Помимо этого в гидратированных смазках должна содержаться вода, четко проявляющаяся в областях $1600\text{--}1640\text{ см}^{-1}$ и $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ [11].

Для смазок, изготовленных на основе гидратированного животного жира или растительного масла, омыленного гидроксидом кальция, характерны те же полосы поглощения, что и для гидратированных смазок на стеарате кальция. Однако в подобных смазках могут присутствовать дополнительные характеристические полосы в областях $1700\text{--}1800\text{ см}^{-1}$ и $1000\text{--}1300\text{ см}^{-1}$, указывающие на триглицериды жирных кислот, которые могли остаться в смазке из-за недостаточной полноты омыления [12].

ИК-спектры комплексных кальциевых смазок, изготовленных на основе стеарата кальция и ацетата кальция, имеют выраженные полосы в областях $1510\text{--}1640\text{ см}^{-1}$, $1000\text{--}1070\text{ см}^{-1}$ и $655\text{--}690\text{ см}^{-1}$ (рис. 4, ИК-спектр № 11) [9].

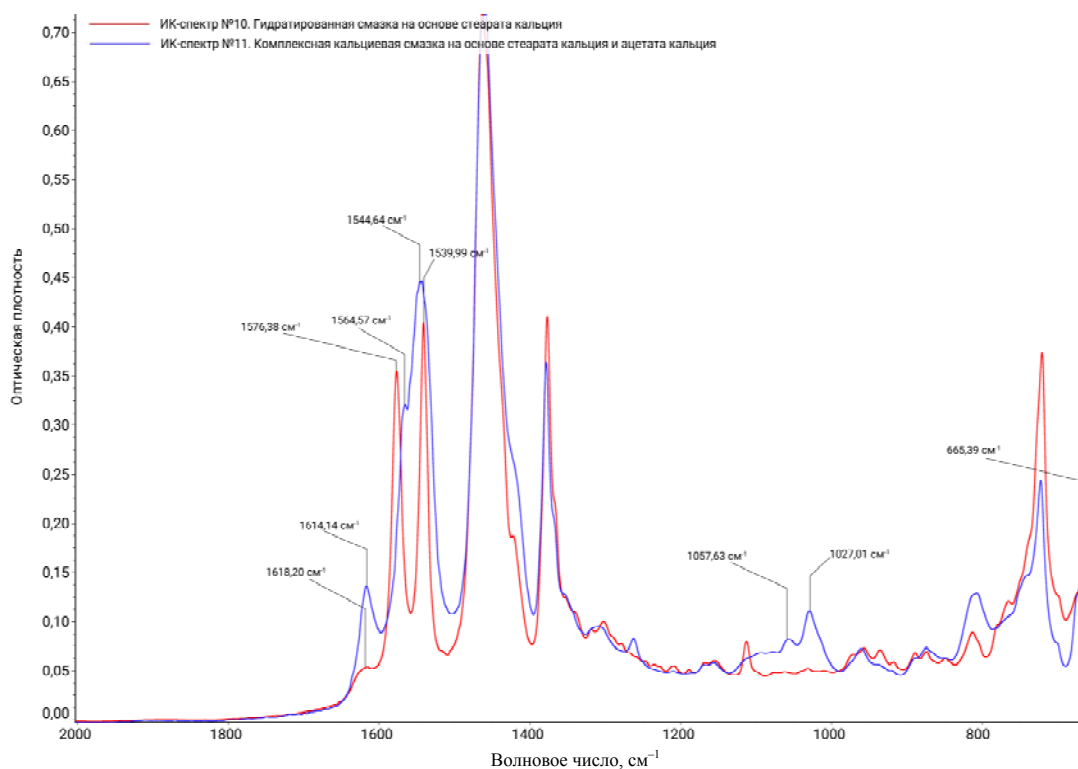


Рис. 4. ИК-спектры в области $600\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ гидратированной смазки на основе стеарата кальция (№ 10), комплексной кальциевой смазки на основе стеарата кальция и ацетата кальция (№ 11)

Комплексные кальциевые сульфонатные смазки – сложнейшие по своей структуре пластичные смазки, имеющие характеристические полосы в областях $1350\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ и $1120\text{--}1240\text{ см}^{-1}$, за которые отвечает акилсульфонат кальция, в области $1540\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ – за счет входящих в состав смазки жирных кислот и комплексообразователя – уксусной кислоты, а также в области $870\text{--}890\text{ см}^{-1}$, связанные с наличием в смазке кальцита – одной из аллотропных модификаций карбоната кальция (рис. 5, ИК-спектр № 12) [13].

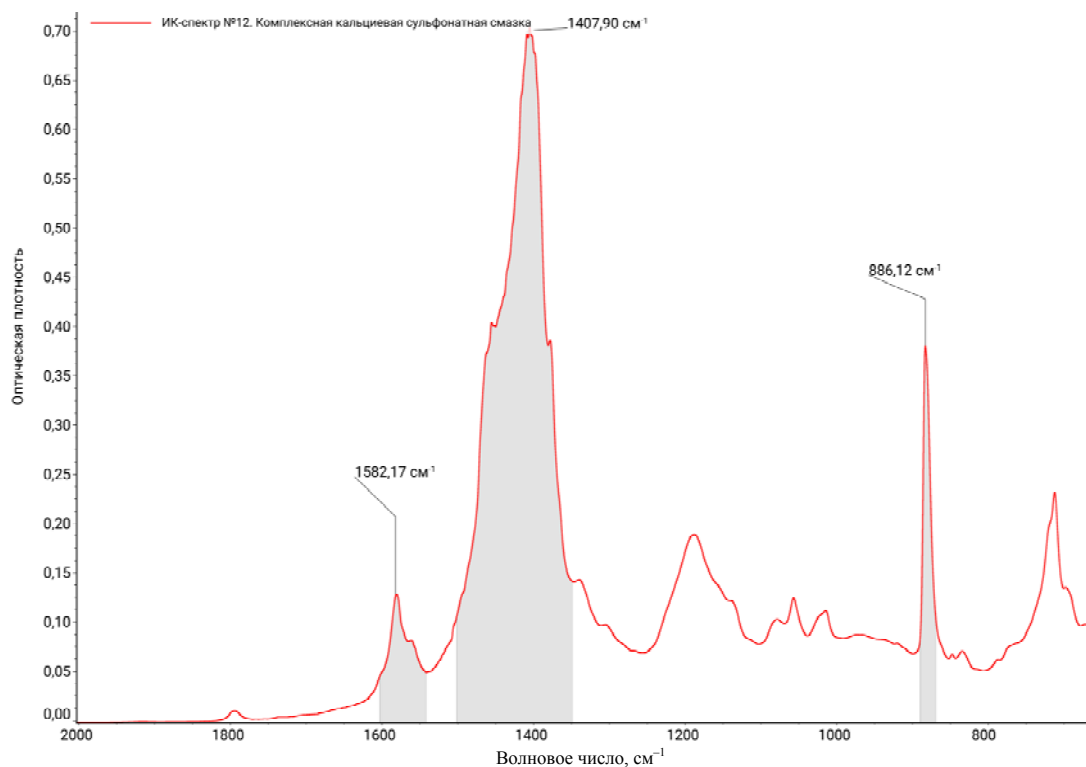


Рис. 5. ИК-спектр комплексной кальциевой сульфонатной смазки в области 600–2000 см^{-1}

ИК-спектры присадок к пластичным смазкам

Можно отметить, что в пластичных смазках широко распространены различного рода присадки, улучшающие физико-химические свойства пластичной смазки. Выделим три наиболее часто используемые функциональные присадки: повышающие температуру каплепадения смазок, улучшающие противоизносные (противозадирные и антикоррозионные) свойства смазок, а также присадки, повышающие коллоидную стабильность смазок и улучшающие адгезионные свойства смазки.

Присадки, повышающие температуру каплепадения смазок, состоят из борированных спиртов. На данный момент самым широко используемым компонентом является трис(2-этилгесил) ортоборат, имеющий характеристические полосы в области 1020–1050 см^{-1} с использованным в составе присадки спиртом, и в области 1315–1355 см^{-1} , указывающей на наличие связи В–О (рис. 6, ИК-спектр № 13) [14].

В качестве функциональной добавки, улучшающей противоизносные, противозадирные и антикоррозионные свойства смазок, обычно используют диалкилдитиофосфат цинка (молибдена), основные характеристические полосы которого находятся в области 930–1100 см^{-1} (валентные колебания Р–О–С), в области 800–900 см^{-1} , связанной с использованным в составе присадки различных спиртов, в области 650–690 см^{-1} (валентные колебания Р=S) (рис. 7, ИК-спектр № 14) [15, 16].

Как присадку, повышающую коллоидную стабильность и улучшающую адгезионные свойства смазки, обычно используют полиизобутилен различной молекулярной массы, характеристические полосы которого находятся в областях 1360–1390 см^{-1} , 1200–1250 см^{-1} (рис. 7, ИК-спектр № 15) [3].

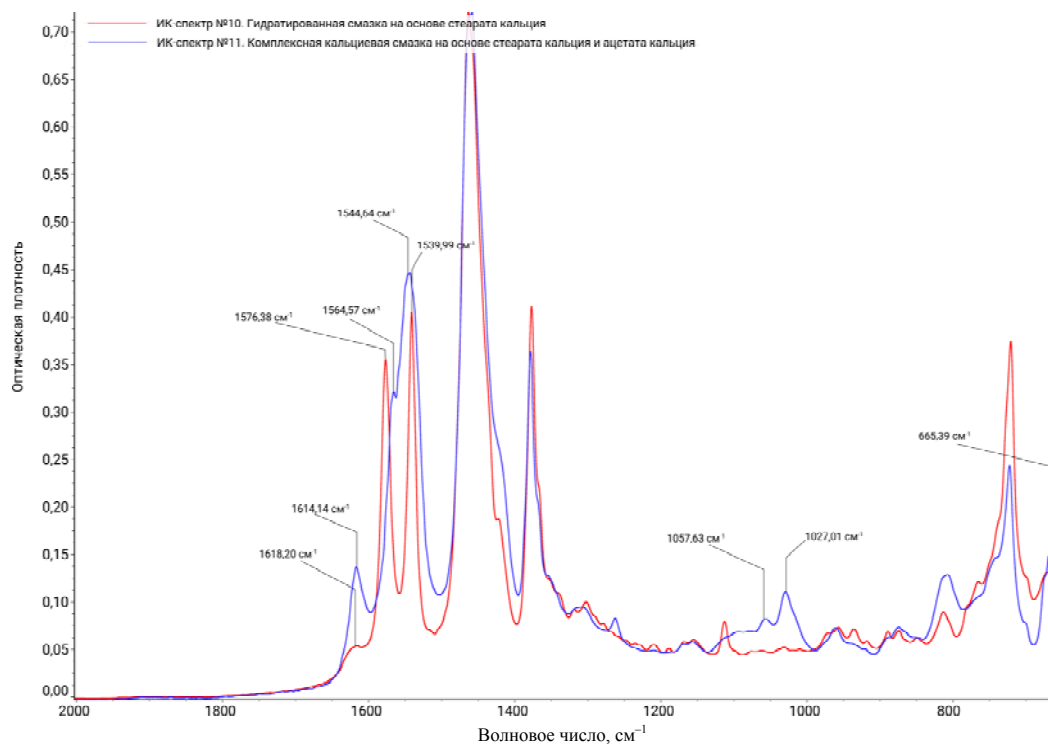


Рис. 6. ИК-спектр смазки на основе 12-гидроксистеарата лития с трис(2-этилгесил) ортоборатом в области 600–2000 см^{-1}

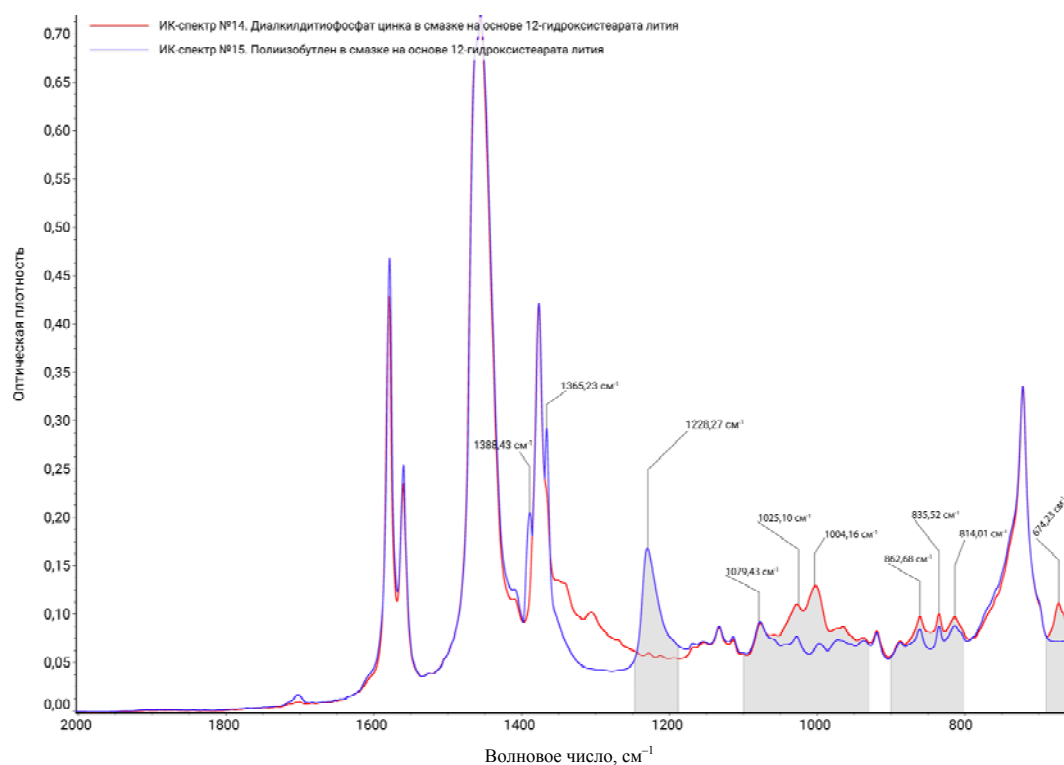


Рис. 7. ИК-спектры смазки на основе 12-гидроксистеарата лития с диалкилдитиофосфатом цинка (№ 14), смазки на основе 12-гидроксистеарата лития с полиизобутиленом (№ 15) в области 600–2000 см^{-1}

Заключение

ИК-спектроскопия является мощным инструментом для анализа состава и структуры пластичных смазок, позволяя идентифицировать их основные компоненты, включая базовые масла, загустители и функциональные присадки. Этот метод сочетает высокую информативность с простотой выполнения, что делает его незаменимым при исследованиях в области разработки и применения пластичных смазок.

Анализ ИК-спектров пластичных смазок может быть использован для осуществления контроля качества смазочных материалов с целью выявления несоответствия заявленному составу, обнаружения посторонних веществ или отсутствия необходимых компонентов, а также для разработки новых составов.

Сравнение спектров эталонных и экспериментальных образцов может помочь в корректировке состава смазки в процессе ее изготовления в реальном времени, а создание расширенных спектральных баз данных поможет ускорить интерпретацию результатов и снизить вероятность изготовления некачественной смазки.

Наряду с этим при помощи ИК-спектроскопии возможно осуществлять контроль подлинности смазочных материалов и выявлять контрафактную продукцию путем сравнения спектров с эталонными образцами.

Мониторинг старения смазок – еще один аспект применения ИК-спектроскопии. Так, по изменению интенсивности полос поглощения (например, карбонильной группы) можно оценить степень деградации смазки в узлах трения в ходе ее использования.

Таким образом, применение инфракрасной спектроскопии для идентификации основных характеристических полос ИК-спектров пластичных смазок позволяет минимизировать риск изготовления некачественной смазки и сократить время промежуточного контроля при производстве, осуществлять разработку новых смазочных материалов, а также дает возможность проводить проверку подлинности пластичных смазок и уровня их эксплуатационных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Договор № T25ИНДА-009 от 1 октября 2025 г.

Литература

1. Смирнова, Н. Н. Инфракрасная спектроскопия в химии высокомолекулярных соединений : учеб. пособие / Н. Н. Смирнова, В. Ю. Чухланов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 84 с.
2. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений : учеб. пособие / А. В. Васильев, Е. В. Гриненко, А. О. Щукин, Т. Г. Федупина. – СПб. : СПбГЛТУ, 2007. – 54 с.
3. Lindon, J. C. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry / J. C. Lindon, G. E. Tranter, J. L. Holmes. – 2nd ed. – Amsterdam : Elsevier, 2010. – 3312 p.
4. Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quality and Safety Analysis of Fats and Oils: A Review / Qi Li, Jia Chen, Zongyao Huyan [et al.] // Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59. – P. 46–57.
5. Standard practice for condition monitoring of used lubricants by trend analysis using Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry : ASTM E2412-23. – Publ. date 01.05.2023. – ASTM International, 2023. – 24 p.
6. Gol'eva, V. E. Determination of Esters in Motor and Industrial Oils by IR Spectrometry / V. E. Gol'eva, M. I. Rudnev, V. A. Pisanov // Journal of Analytical Chemistry. – 2005. – Vol. 60, N 8. – P. 719–722.

7. Определение загущающей присадки «Максойл ВЗ-011» в гидравлических маслах методами ИК-спектроскопии и ВЭЖХ / Л. В. Красная, А. В. Чернышева, П. А. Гаврилов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12. – С. 68–73.
8. Аддитивна ли оптическая плотность смесей в ИК-области? / С. В. Усова, Ю. П. Богза, Д. С. Гончаров, В. И. Вершинин // Аналитика и контроль. – 2011. – Т. 15, № 1. – С. 78–86.
9. Фукс, И. Г. Применение ИК-спектроскопии при изучении состава и свойств смазок / И. Г. Фукс, Т. В. Медведева, Ю. Л. Ищук // Химия и технология топлив и масел. – 1972. – № 2. – С. 56–59.
10. Cleverley, B. The Comparison of Lubricating Greases using Infrared Spectroscopy / B. Cleverley. – New Zealand, 1964. – P. 69–70.
11. Ермаков, С. Ф. Методика определения стабилизационной воды в пластичных смазках на основе мыльных загустителей при помощи ИК-Фурье спектроскопии / С. Ф. Ермаков, А. В. Тимошенко, Н. В. Грудина // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2017. – № 3. – С. 5–14.
12. Пенчева, О. З. Использование ИК-спектроскопии в исследованиях окисления жира / О. З. Пенчева, М. Д. Цонев // Химия и технология топлив и масел. – 1973. – № 77. – С. 55–57.
13. Структура и свойства комплексной сульфонат кальциевой смазки / В. И. Жорник, А. В. Ивахник, В. П. Ивахник, А. В. Запольский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 1 (42). – С. 44–50.
14. Ивахник, А. В. Апробация нового подхода к формированию дисперсной фазы комплексных литиевых пластичных смазок / А. В. Ивахник, В. И. Жорник // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 69–76.
15. Экспресс-анализ моторных масел на основе инфракрасной спектроскопии с разложением в ряд Фурье / А. А. Хазиев, А. В. Лаушкин, А. В. Постоит [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 2. – С. 116–125.
16. Faisal, A. Study of Thermal Degradation of Zinc and Boron based Lubricant Additives using Fourier Transform Infrared and Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy / A. Faisal. – Sweden : Luleå University of Technology, 2010. – 32 p.

References

1. Smirnova N. N., Chukhlanov V. Yu. *Infrared spectroscopy in high-molecular chemistry*. Vladimir, Izd-vo VIGU, 2021. 84 p. (in Russian).
2. Vasiliev A. V., Grinenko E. V., Shchukin A. O., Fedulina T. G. *Infrared spectroscopy of organic and natural compounds*. Saint Petersburg, SPbGLTU, 2007. 54 p. (in Russian).
3. Lindon J. C., Tranter G. E., Holmes J. L. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2010. 3312 p.
4. Li Q., Chen J., Huyan Z., Kou Y., Xu L., Yu X., Gao J.-M. Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quality and Safety Analysis of Fats and Oils: A Review. *Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 59, pp. 46–57.
5. ASTM E2412-23 *Standard practice for condition monitoring of used lubricants by trend analysis using Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry*. ASTM International Publ., 2023, 24 p.
6. Gol'eva V. E., Rudnev M. I., Pisanov V. A. Determination of Esters in Motor and Industrial Oils by IR Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2005, vol. 60, no. 8, pp. 719–722.
7. Krasnaya L. V., Chernysheva A. V., Gavrillov P. A., Zueva V. D., Balak G. M., Kuznetsova O. Yu., Privalenko A. N. Determination of the thickening additive “Maxoil B3-011” in hydraulic oils by IR spectroscopy and HPLC. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2017, no. 12, pp. 68–73 (in Russian).

8. Usova S. V., Bogza Yu. P., Goncharov D. S., Vershinin V. I. Is the optical density of mixtures additive in the IR region? *Analitika i kontrol' = Analytics and Control*, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 78–86 (in Russian).
9. Fuchs I. G., Medvedeva T. V., Ischuk Yu. L. Application of IR spectroscopy in studying the composition and properties of lubricants. *Himija i tehnologija topliv i masel = Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 1972, no. 2, pp. 56–59 (in Russian).
10. Cleverley B. *The Comparison of Lubricating Greases using Infrared Spectroscopy*. New Zealand, 1964. pp. 69–70.
11. Ermakov S. F., Timoshenko A. V., Grudina N. V. Method for determining stabilization water in plastic lubricants based on soap thickeners using FTIR spectroscopy. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. P. O. Suhogo*, 2017, no. 3, pp. 5–14 (in Russian).
12. Pencheva O. Z., Tsonev M. D. Use of IR spectroscopy in fat oxidation studies. *Himija i tehnologija topliv i masel*, 1973, no. 77, pp. 55–57 (in Russian).
13. Zhornik V. I., Ivakhnik A. V., Ivakhnik V. P., Zapolsky A. V. Structure and properties of complex calcium sulfonate grease. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2018, no. 1 (42), pp. 44–50 (in Russian).
14. Ivakhnik A. V., Zhornik V. I. Testing a new approach to the formation of the dispersed phase of complex lithium plastic lubricants. *Polimernye materialy i tehnologii = Polymer Materials and Technologies*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 69–76 (in Russian).
15. Khaziev A. A., Laushkin A. V., Postolit A. V., Vasilyeva L. S., Borisov B. S. Rapid analysis of motor oils based on infrared spectroscopy using Fourier series. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija = Transport. Transport Structures. Ecology*, 2017, no. 2, pp. 116–125 (in Russian).
16. Faisal A. *Study of Thermal Degradation of Zinc and Boron based Lubricant Additives using Fourier Transform Infrared and Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. Sweden, Luleå University of Technology, 2010. 32 p.

Поступила 09.06.2025 г.