

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-20-26>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРИИ В ПРОДУКТЕ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

© Ксения Андреевна Михайлова, Вадим Дмитриевич Черепанов*,
Арина Юрьевна Волегова, Игорь Евгеньевич Кузора

АО «Ангарская нефтехимическая компания», Россия, 665830, Иркутская обл., г. Ангарск, а/я 65;

*e-mail: Cherepanovvd@anhk.rosneft.ru

*Статья поступила 13 января 2020 г. Поступила после доработки 16 апреля 2020 г.
Принята к публикации 27 мая 2020 г.*

С учетом недостатков существующих методов определения ароматических углеводородов (АУВ) в компонентах дизельного топлива предложена методика контроля содержания АУВ в средних дистиллятах с использованием ИК-Фурье-спектроскопии. В качестве объекта исследования был выбран один из компонентов для компаундирования дизельных топлив, получаемый в АО «АНХК» при гидроочистке сырья в жестких условиях (30 МПа, 380 – 400 °С). Зарегистрировав спектр поглощения очищенного компонента, выбрали условия ИК-спектроскопического анализа (значение волнового числа — 1606,5 см⁻¹, материал кюветы — NaCl, толщина поглощающего слоя — 0,1 см). Для построения градуировочной зависимости в образцах исследуемого гидрогенизата, отобранных в разные моменты времени и содержащих в среднем 1 – 8 % АУВ (в зависимости от параметров непрерывно работающей установки), определяли суммарное содержание АУВ методом ВЭЖХ, а затем методом ИК-спектроскопии — соответствующее значение оптической плотности образца. Метрологические характеристики предложенной методики оценили в соответствии с требованиями РМГ 76–2014. Правильность полученных результатов определения АУВ подтвердили путем сравнения с данными независимого метода анализа (титриметрического). Для использования разработанной методики при анализе других компонентов дизельного топлива необходимы дополнительные исследования по определению мешающих веществ и оценке их влияния на точность определения АУВ.

Ключевые слова: ароматические углеводороды; ИК-спектроскопия; высокоэффективная жидкостная хроматография; дизельное топливо; гидроочистка.

DETERMINATION OF THE TOTAL CONTENT OF AROMATIC HYDROCARBONS BY FOURIER-TRANSFORM IR SPECTROSCOPY IN THE PRODUCTS OF DIESEL HYDROFINING

© Kseniya A. Mikhaylova, Vadim D. Cherepanov*, Arina Yu. Volegova, Igor E. Kuzora

JSC “Angarsk Petrochemical Company”, POB 65, Angarsk, Irkutsk obl., 665830, Russia;

*e-mail: Cherepanovvd@anhk.rosneft.ru

Received January 13, 2020. Revised April 16, 2020. Accepted May 27, 2020.

A comparative analysis of current methods for determination of aromatic hydrocarbons in the components of diesel fuel revealed that IR spectrometry appeared to be the most optimal method for operational control of the content of aromatic hydrocarbons in medium distillate products of the hydrogenation process. We developed a procedure for quantitative determination of aromatic hydrocarbons in the components of diesel fuel using IR Fourier spectroscopy. The analysis of absorption spectra of the components of diesel fuel revealed that the optical density of the stretching vibration band of the aromatic ring is proportional to the quantitative content of aromatic hydrocarbons (AHC) in the components of diesel fuel. One of the components for compounding diesel fuels obtained at JSC “ANKhK” during hydrotreating of raw materials under severe conditions (30 MPa, 380 – 400 °C) was selected as an object of the study. Conditions of IR spectrometric analysis (wave number — 1606.5 cm⁻¹, cell material — NaCl, absorbing layer thickness — 0.1 cm) were specified after recording of the absorption spectrum of the purified component. To construct a calibration dependence the total AHC content and corresponding optical density of the sample were determined by the methods of HPLC and IR spectrometry, respectively. The samples of hydrogenate under study (taken at different timepoints) contained 1 – 8% AHC on average depending on the parameters of a continuously operating unit. The characteristics of the proposed procedure were evaluated in accordance with the requirements of RMG 76–2014. The correctness of the obtained results of AHC

determination was confirmed in comparison with the data of independent (tetrimetric) analysis. The use of the developed method in analysis of other components of diesel fuel, requires additional studies to determine the interfering substances and assess their impact on the accuracy of AHC determination.

Keywords: aromatic hydrocarbons; FT-IR spectroscopy; HPLC; diesel fuel; hydrofining.

Введение

Содержание ароматических углеводородов (АУВ) — важная характеристика дизельного топлива и других нефтепродуктов, определяющая не только количество несгорающих углеводородов и твердых частиц в отработанных газах дизельных двигателей, но также экологические и технологические свойства топлива в целом. Повышенное содержание АУВ увеличивает нагарообразование и выброс в атмосферу твердых частиц; снижает цетановое число дизельного топлива; ухудшает экологические показатели топлива за счет высокой токсичности самих АУВ и увеличения выброса оксидов азота в атмосферу, объем которого зависит от содержания АУВ [1 – 3]. Именно поэтому на сегодняшний день методам контроля содержания ароматических углеводородов уделяется особое внимание.

Наиболее распространенным является титриметрический метод по ГОСТ 6994–74¹, основанный на реакции непредельных и ароматических углеводородов испытуемого нефтепродукта с концентрированной серной кислотой (98,5 – 99,0 % масс.): в делительную воронку вносят определенную массу нефтепродукта, добавляют 30 см³ серной кислоты и встряхивают пробу 30 мин, после чего отстаивают ее в течение одного часа; затем декантируют нижний сернокислотный слой, а верхний переносят в коническую колбу и титруют раствором гидроксида натрия (0,5 моль/дм³) до появления слабо-розового окрашивания.

Другой метод определения АУВ — метод анилиновых точек по ГОСТ 12329–77² — применим в интервале содержаний АУВ от 1 до 5 % масс. в прямогонных бензинах. Рефрактометрический метод также имеет низкий предел обнаружения АУВ, а небольшое различие в показателях преломления ароматической и парафино-нафтенной фракций усложняет определение. В качестве аналога рефрактометрического способа используют метод магнитного двулучепреломления [4]. Одним из новейших методов определения АУВ в товарном дизельном топливе по ГОСТ Р ЕН

12916–2008³ является метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с рефрактометрическим детектированием, который позволяет определить моно-, ди- и полиароматические углеводороды, но отличается высокой стоимостью и длительным проведением анализа.

Таким образом, применяемые методы определения АУВ имеют ряд недостатков: сложность подготовки и длительность выполнения анализа, высокая стоимость, невозможность автоматизации, повышенная опасность работы с концентрированной серной кислотой и др.

В настоящее время для этой цели широкое распространение получил метод ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, который обладает рядом преимуществ по сравнению с перечисленными выше: спектрометры с преобразованием Фурье позволяют регистрировать спектры жидких и твердых образцов с высокой точностью (до 10^{–4} см^{–1}) примерно за 1 с; наложение нескольких спектров позволяет избавиться от шумов, что обеспечивает определение следовых количеств веществ; Фурье-спектрометры не нуждаются во внешних стандартах для градуировки волновых чисел, а разрешающую способность можно корректировать, изменяя величину хода зеркал. Кроме того, метод ИК-спектроскопии позволяет определять ароматические соединения в продукте напрямую, без предварительной подготовки [5 – 9].

Использование метода ИК-спектроскопии регламентировано для определения ароматических углеводородов в электроизоляционных маслах — ГОСТ 28640–90 (МЭК 590–77, DIN IEC 60590), а также для определения бензола в автомобильных и авиационных бензинах — ГОСТ 31871–2012.

В работе [10] была исследована возможность использования метода ИК-спектроскопии для определения АУВ в различных по происхождению и фракционному составу продуктах нефтепереработки, в том числе и средних дистиллятах. Рассмотренные в данной работе нефтепродукты обладали «узким» фракционным составом и содержали мешающие компоненты — гетероатомные соединения. Полученные результаты

¹ ГОСТ 6994–74. Нефтепродукты светлые. Метод определения ароматических углеводородов. — М.: Стандартинформ, 2006. — 5 с.

² ГОСТ 12329–77. Нефтепродукты и углеводородные растворители. Метод определения анилиновой точки и ароматических углеводородов. — М.: Стандартинформ, 2006. — 4 с.

³ ГОСТ Р ЕН 12916–2008. Нефтепродукты. Определение типов ароматических углеводородов в средних дистиллятах. Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с детектированием по коэффициенту рефракции. — М.: Стандартинформ, 2008. — 14 с.

хорошо коррелировали с результатами других методов.

В связи с этим цель настоящей работы заключалась в разработке способа определения суммарного содержания АУВ (ΣАУВ) в компоненте дизельного топлива методом ИК-Фурье спектроскопии.

Экспериментальная часть

Анализируемый образец. В АО «АНХК» одним из компонентов для компаундирования дизельных топлив является продукт, получаемый в процессе гидрооблагораживания сырья в жестких условиях (при давлении до 30,0 МПа и температуре 380 – 400 °С), что обеспечивает полное удаление азот-, серо- и кислородсодержащих органических соединений и непредельных углеводородов, а также частичное удаление АУВ. Основные показатели качества очищенного компонента дизельных топлив представлены в табл. 1.

Как видно из представленной таблицы, объект исследования не содержит серу, азот и металлы, в нем практически полностью отсутствуют непредельные углеводороды. Ароматические углеводороды представлены исключительно производными бензола.

Операционный контроль процесса гидрооблагораживания проводят по остаточному содержанию АУВ как наиболее трудно гидрируемых соединений с использованием титриметрического метода по ГОСТ 6994–74 (время выполнения анализа — 210 мин). Поэтому данный продукт

был выбран в качестве объекта исследования. Пробы образца отбирали в соответствии с ГОСТ 2517–2012⁴. Объединенную пробу отбирали из вертикальных резервуаров с помощью стеклянной бутылки в металлическом каркасе.

Оборудование. ИК-спектры образца регистрировали с помощью ИК-Фурье-спектрометра IRAffinity-1S (Shimadzu, Япония). Кювета была изготовлена из NaCl, что позволяло регистрировать спектр поглощения в области валентных колебаний ароматических соединений (5000 – 625 см⁻¹) [11, 12].

На выбор толщины кюветы могут влиять количество имеющегося в распоряжении образца или его растворимость. Толщину поглощающего слоя выбирают таким образом, чтобы интенсивность полосы валентных колебаний интересующей функциональной группы была не ниже 0,01 и не выше 1 [9, 12, 13]. Оптимальная толщина кюветы для анализа гидрогенизата составляла 0,1 см.

Для контрольных хроматографических измерений использовали жидкостной хроматограф ProStar (Varian Inc., США), время анализа при проведении двух параллельных определений составляло 360 мин.

Обсуждение результатов

В исследуемом образце определили АУВ методом ВЭЖХ по ГОСТ 12916–2008: установили,

⁴ ГОСТ 2517–2012. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. — М.: Стандартинформ, 2018. — 31 с.

Таблица 1. Основные показатели качества гидрогенизата — очищенного компонента дизельного топлива

Table 1. Main quality indicators of hydrogenate (a purified component of diesel fuel)

Характеристика	НД на метод испытаний	Значение
Плотность при 15 °С, кг/м ³	ГОСТ Р 51069–97	836
Массовая доля серы, мг/кг	ГОСТ ISO 20884–16	Менее 5
Массовая доля азота, мг/кг	ASTM D 4629–17	Менее 0,3
Содержание металлов, мг/кг:	IP501:15	
натрий		Менее 1
никель		Менее 1
ванадий		Менее 1
алюминий		Менее 5
кремний		Менее 10
Йодное число, г I ₂ /100 г	ГОСТ 2070–82	0,4
Наличие водорастворимых щелочей	ГОСТ 6307–75	Нет
Испытание на медной пластинке при 100 ± 1 °С в течение 3 ч	ГОСТ 6321–92	Выдерживает
Содержание ароматических углеводородов, %:	ГОСТ 12916–2018	
моно-		1,0 – 8,0
би-		Менее 0,1
три- и более		Менее 0,1

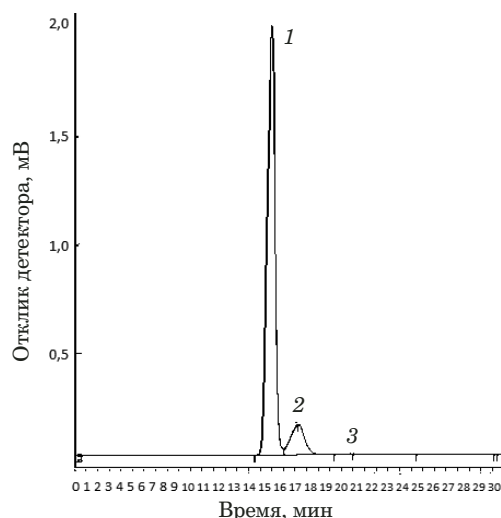


Рис. 1. Хроматограмма исследуемого компонента дизельного топлива: 1 — неароматические; 2 — моноароматические; 3 — диароматические углеводороды

Fig. 1. Chromatogram of the studied component of diesel fuel: 1 — non-aromatic hydrocarbons; 2 — monoaromatic hydrocarbons; 3 — diaromatic hydrocarbons

что в продукте гидрирования содержатся только моно-АУВ (рис. 1) [14].

Выбор спектрального диапазона определения АУВ обусловлен наличием скелетных колебаний $C=C$ -связи при $1600 - 1500 \text{ см}^{-1}$. В зависимости от взаимного влияния других функциональных групп положение полосы валентных колебаний углеродных связей ароматического кольца может изменяться в диапазоне $1595 - 1625 \text{ см}^{-1}$ ⁵ [10, 15]. Кроме того, полосы валентных колебаний $C-H$ связей в АУВ наблюдаются в интервале $3100 - 3000 \text{ см}^{-1}$ и ближней ИК-области спектра (900 и 675 см^{-1}).

На рис. 2 приведен ИК-спектр исследуемого компонента дизельного топлива. Видно, что в областях «отпечатков пальцев» и 3000 см^{-1} не наблюдаются характеристические полосы АУВ, а в диапазоне $1595 - 1622 \text{ см}^{-1}$ присутствуют полосы, относящиеся к валентным колебаниям углеродных связей ароматического кольца. Поэтому оптическую плотность образцов, линейно зависящую от содержания АУВ, измеряли при значении волнового числа $1606,5 \text{ см}^{-1}$, соответствующем канту полосы.

В качестве образцов сравнения мы использовали пробы гидрогенизата, отобранные в разные моменты времени: изменение параметров непрерывно работающей установки для очистки дизельного топлива (в частности, температуры) обуславливает различное содержание АУВ в получаемом гидрогенизате. В этих образцах опреде-

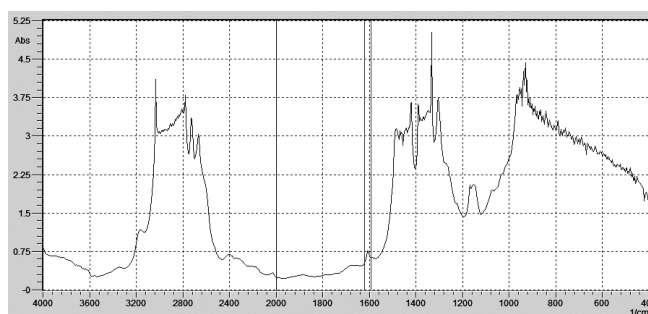


Рис. 2. ИК-спектр исследуемого компонента дизельного топлива

Fig. 2. IR spectrum of the diesel fuel component under study

ляли АУВ методом ВЭЖХ и для построения градуировочной зависимости использовали пробы, в которых содержание АУВ было примерно целочисленным: такие пробы анализировали методом ИК-Фурье-спектроскопии и строили градуировочный график в координатах «суммарное содержание АУВ — оптическая плотность образцов сравнения» (табл. 2).

Градуировочная зависимость описывается уравнением $y = 0,0503x - 0,0251$ ($R^2 = 0,9945$).

Правильность результатов определения АУВ по предложенной методике проверяли с использованием референтного титриметрического метода (ГОСТ 6994), который предполагается заменить разработанной методикой. Для проведения сравнительных испытаний ежедневно с «потока» в соответствии с требованиями ГОСТ 2517-2012 отбирали пробы очищенного компонента дизельного топлива и анализировали указанными методами (табл. 3).

Как видно из представленных данных, расхождения между двумя методами не превышали $0,9 \%$ масс., при этом необходимо учитывать, что результат по ГОСТ 6994 приводится с точностью до целых значений, а сходимость составляет 1% абс., что дополнительно накладывает по-

Таблица 2. Результаты анализа образцов сравнения методом ИК-Фурье-спектроскопии ($n = 5$; $P = 0,95$)

Table 2. Results of FT IR analysis of the referenced samples ($n = 5$; $P = 0.9$)

Средняя массовая доля АУВ, определенная методом ВЭЖХ, %	Оптическая плотность образца
1,0	$0,0125 \pm 0,0011$
3,1	$0,1299 \pm 0,0014$
4,0	$0,1862 \pm 0,0008$
5,0	$0,2381 \pm 0,0007$
6,0	$0,2766 \pm 0,0009$
7,0	$0,3224 \pm 0,0005$
8,0	$0,3700 \pm 0,0011$

⁵ Анисимова Н. А. Идентификация органических соединений: уч. пособие. — Горно-Алтайск: РИО Горно-Алтайского госун-та, 2009. — 95 с.

Таблица 3. Результаты определения ароматических углеводородов в очищенном компоненте дизельного топлива референтным и разработанным методами**Table 3.** Results of AHC determination in the purified component of diesel fuel by the developed method and reference procedures

Номер образца	Содержание АУВ, % масс.		Δ , %	Номер образца	Содержание АУВ, % масс.		Δ , %
	ИК-спектрометрия	ГОСТ 6994			ИК-спектрометрия	ГОСТ 6994	
1	5,7	5	0,7	31	3,0	3	0,0
2	5,5	5	0,5	32	3,0	3	0,0
3	5,7	5	0,7	33	1,7	1	0,7
4	5,8	5	0,8	34	1,7	2	0,3
5	5,9	5	0,9	35	2,3	2	0,3
6	5,8	5	0,8	36	2,5	2	0,5
7	2,3	2	0,3	37	2,5	3	0,5
8	10,5	10	0,5	38	1,8	2	0,2
9	7,8	7	0,8	39	1,7	2	0,3
10	2,3	2	0,3	40	1,7	1	0,7
11	2,3	3	0,7	41	3,1	3	0,1
12	2,5	3	0,5	42	2,5	3	0,5
13	2,3	2	0,3	43	3,3	3	0,3
14	2,8	2	0,8	44	3,6	3	0,6
15	2,3	2	0,3	45	3,6	3	0,6
16	0,5	1	0,5	46	3,7	3	0,7
17	2,6	3	0,4	47	3,7	3	0,7
18	2,4	2	0,4	48	3,7	3	0,7
19	2,4	2	0,4	49	3,2	4	0,8
20	2,8	2	0,8	50	3,9	3	0,9
21	2,8	2	0,8	51	3,7	3	0,7
22	2,7	2	0,7	52	2,9	2	0,9
23	3,7	3	0,7	53	2,9	2	0,9
24	3,4	3	0,4	54	2,6	2	0,6
25	3,4	3	0,4	55	2,6	2	0,6
26	2,8	2	0,8	56	2,3	2	0,3
27	2,8	3	0,3	57	2,3	2	0,3
28	2,6	3	0,4	58	2,1	2	0,1
29	2,7	3	0,3	59	2,5	2	0,5
30	3,7	3	0,7	60	2,9	2	0,9

грешность при сравнении. Проведенный расчет стандартного отклонения между результатами двух методов составил 0,473 % масс., что входит в повторяемость по ГОСТ 6994.

Для внутреннего контроля качества результатов определения суммарного содержания АУВ методом ИК-Фурье-спектрометрии рассчитали метрологические характеристики анализа согласно требованиям РМГ 76–2014⁶ (табл. 4).

⁶ РМГ 76–2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа. — М.: Стандартинформ, 2016. — 111 с.

Повторяемость результатов анализа оценили по критерию Кохрена, предварительно рассчитав среднее арифметическое и выборочную дисперсию: оценка показала, что процедура выполнения анализа соблюдена. Для оценки внутрилабораторной прецизионности проверили средние значения на наличие выбросов по критерию Граббса (выбросы отсутствуют). Показатель правильности оценили с помощью критерия Стьюдента: установлено, что смещение результатов анализа незначимо на фоне случайного разброса [6].

Таблица 4. Показатели качества результатов ИК-спектрометрического определения АУВ в очищенном компоненте дизельного топлива**Table 4.** Quality indicators of IR spectrometric determination of AHC in a purified component of diesel fuel

Характеристика	Значение
Среднеквадратическое отклонение результатов анализа, полученных в условиях повторяемости $\sigma_{гд}$, %	0,02
Предел повторяемости r_d , %	0,06
Среднеквадратическое отклонение результатов анализа, полученных в условиях внутрилабораторной прецизионности $\sigma_{Рд}$, %	0,08
Предел внутрилабораторной прецизионности R_d , %	0,23
Показатель точности результатов анализа Δ_d , %	0,16

Заключение

Таким образом, разработана методика ИК-Фурье-спектрометрического определения суммарного содержания АУВ в очищенном компоненте дизельного топлива. В отличие от регламентируемых ГОСТ методик (хроматографической и титриметрической), предложенный способ является экспрессным: время выполнения анализа составляет 31 мин. Для оценки правильности методики результаты ИК-спектрометрического определения АУВ сравнили с результатами независимого метода (титриметрического): расхождение результатов, полученных двумя методами, статистически незначимо.

Следует отметить, что разработанная методика определения ароматических углеводородов в гидрогенизате дизельного топлива предполагает отсутствие мешающих веществ (фенолов, полиолефинов, серосодержащих и карбонильных соединений) в пробе. Использование данной методики для определения АУВ в других компонентах дизельного топлива нецелесообразно без проведения дополнительных исследований по определению мешающих веществ, оценки их влияния на точность методики и разработки способа пробоподготовки таких образцов.

ЛИТЕРАТУРА

- Охотина Н. А., Шапиров Э. Н., Ильязов М. Ф., Ефимов М. В. Проблемы загрязнения продуктами резиновой промышленности полициклическими ароматическими углеводородами. Часть 1 / Вест. Казанского техн. ун-та. 2013. Т. 20. № 21. С. 129 – 131.
- Ахметов А. Ф., Красильникова Ю. В. Производство топлив с улучшенными экологическими свойствами / Башкирский хим. журн. 2009. Т. 16. № 2. С. 160 – 164.
- Рахманин Ю. А., Леванчук А. В. Количественная пространственно-временная оценка загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух в результате сгорания топлива автомобильного транспорта / Гигиена и санитария. 2016. Т. 11. № 95. С. 1021 – 1024.
- Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. — Л.: Химия, 1983. — 352 с.
- Тарасевич Б. Н. Основы ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК-спектроскопии. — М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2012. — 22 с.

- Иванова Л. В., Сафиева Р. З., Кошелев В. Н. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов / Вест. Башкирского ун-та. 2008. Т. 13. № 4. С. 869 – 874.
- Скиданов Р. В., Бланк В. А., Морозов А. А. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы / Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 2. С. 218 – 223.
- Галанов Е. К., Бодунов Е. Н. Инфракрасный спектрометр для исследования состава газов жидкостей и твердых тел / Известия ПГУПС. 2011. № 3. С. 138 – 143.
- Вершинин В. И. Новые подходы к спектрофотометрическому анализу неразделенных смесей органических веществ / Химия в интересах устойчивого развития. 2013. Т. 21. № 1. С. 9 – 20.
- Mohammed A., Hankish K. Determination of Aromatic Hydrocarbons in Petroleum Fractions by Infrared Spectroscopy / Analyst. 1985. Vol. 110. N 12. P. 1477 – 1480. DOI: 10.1039/AN9851001477.
- Ибрагимова М. Д., Сеидова С. А., Гусейнов Г. Дж. и др. Исследование структурно-группового состава рафината и экстракта, полученных деароматизацией смеси прямогонной дизельной фракции с продуктами вторичной переработки нефти / Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 8. С. 14 – 20.
- Морозов А. Н., Кочиков И. В., Новгородская А. В. и др. Статистическая оценка вероятности правильного обнаружения веществ в ИК-Фурье спектрометрии / Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 614 – 620.
- Алаторцев Е. И., Иванов В. А. Критерии оценки достоверности методов испытаний нефтепродуктов / Нефтепереработка и нефтехимия. 2015. № 11. С. 14 – 16.
- Вершинин В. И., Коптева Е. В., Троицкий В. В. Компьютерная ИК-спектрометрия как способ определения структурно-группового состава бензинов / Аналитическая химия. Оборудование лабораторий. 2005. № 5. С. 1 – 6.
- Мозохин А. Е., Колесникова И. А., Дроздов В. Г. Обоснование возможности качественного анализа химического состава льяной тресты методом ИК-спектрометрии ближайшей области / Вестн. Костромского гос. ун-та. 2012. Т. 18. № 1. С. 31 – 36.

REFERENCES

- Okhotina N. A., Shapirov E. N., Ilyazov M. F., Efimov M. V. Problems of pollution by rubber products with polycyclic aromatic hydrocarbons. Part 1 / Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ. 2013. Vol. 20. N 21. P. 129 – 131 [in Russian].
- Akhmetov A. F., Krasilnikova Yu. V. Production of fuels with improved environmental properties / Bashkir. Khim. Zh. 2009. Vol. 16. N 2. P. 160 – 164 [in Russian].
- Rakhmaninov Yu. A., Levanchuk A. V. Quantitative spatio-temporal assessment of pollutants entering the atmospheric air as a result of the combustion of fuel from motor vehicles / Gigiena Sanit. 2016. Vol. 11. N 95. P. 1021 – 1024 [in Russian].
- Ioffe B. V. Refractometric methods in chemistry. — Leningrad: Khimiya, 1983. — 352 p. [in Russian].

5. **Tarasevich B. N.** Fundamentals of FTIR. Sample preparation in IR spectroscopy. — Moscow: Izd. MGU, 2012. — 22 p. [in Russian].
6. **Ivanova L. V., Safieva R. Z., Koshelev V. N.** IR spectrometry in the analysis of oil and oil products / Vestn. Bashkir. Univ. 2008. Vol. 13. N 4. P. 869 – 874 [in Russian].
7. **Skidanov R. V., Blank V. A., Morozov A. A.** Study of an imaging spectrometer based on a diffraction lens / Komp'yut. Optika. 2015. Vol. 39. N 2. P. 218 – 223 [in Russian].
8. **Galanov E. K., Bodunov E. N.** Infrared spectrometer for studying the composition of gases of liquids and solids / Vestn. PGUPS. 2011. N 3. P. 138 – 143 [in Russian].
9. **Vershinin V. I.** New approaches to spectrophotometric analysis of undivided mixtures of organic substances / Khimiya Interes. Ust. Razv. 2013. Vol. 21. N 21. P. 9 – 20 [in Russian].
10. **Mohammed A., Hankish K.** Determination of Aromatic Hydrocarbons in Petroleum Fractions by Infrared Spectroscopy / Analyst. 1985. Vol. 110. N 12. P. 1477 – 1480. DOI: 10.1039/AN9851001477.
11. **Ibragimova M. D., Seidova S. A., Huseynova G. J., et al.** Study of the structural-group composition of raffinate and extract obtained by dearomatization of a straight-run diesel fraction mixture with products of secondary oil refining / Neftepererab. Neftekhim. 2018. N 8. P. 14 – 20 [in Russian].
12. **Morozov A. N., Kochikov I. V., Novgorodskaya A. V., et al.** Statistical Estimation of the Probability of the Correct Substance Detection in FT IR Spectroscopy / Komp'yut. Optika. 2015. Vol. 39. N 4. P. 614 – 620. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-614-621.
13. **Alatortsev E. I., Ivanov V. A.** Criteria for assessing the reliability of testing methods for oil products / Neftepererab. Neftekhim. 2015. N 11. P. 14 – 16 [in Russian].
14. **Vershinin V. I., Kopteva E. V., Troitsky V. V.** Computer IR spectrometry as a method for determining the structural-group analysis of gasolines / Analit. Khim. Oborud. Lab. 2005. N 5. P. 1 – 6 [in Russian].
15. **Mozokhin A. E., Kolesnikova I. A., Drozdov V. G.** Substantiation of the possibility of a qualitative analysis of the chemical composition of flax trusts by IR spectrometry of the nearest area / Vestn. Kostrom. Univ. 2012. Vol. 18. N 1. P. 31 – 36 [in Russian].