

**Казанский Федеральный Университет**  
**Кафедра технологии нефти, газа и углеродных материалов**  
**Kazan Federal University,**  
**Department of high-viscosity oils and natural bitumen**

**Хроматографический анализ компонентов нефти: методы, подходы и  
практическое применение**

**Chromatographic Analysis of Crude Oil Components: Methods,  
Approaches, and Practical Applications**

Альогаили Сафаа Рахим шанеф, Aloghaili Safaa Rahim Shanef<sup>1</sup>

Баймагамбетов Александр Игоревич, Baimagambetov Alexander<sup>2</sup>

Ибрагимова Дина Абдуррафиковна, Ibragimova Dina Abdulrafikovna<sup>3</sup>

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich<sup>4</sup>

магистрант группы 03-418 кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>1</sup>

магистрант группы 03-418 кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>2</sup>

кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии переработки нефти и  
газа<sup>3</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных  
материалов<sup>4</sup>,

<sup>1,2,3,4</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, Россия

УДК 502.7. Шифр научной специальности ВАК: 1.4.12. «Нефтехимия»

E-mail: kemalov@mail.ru<sup>4</sup>

**Аннотация:** в настоящей статье представлен систематизированный обзор методов хроматографического анализа компонентов нефти. Особое внимание уделено современным направлениям развития газовой, жидкостной и гель-проникающей хроматографии в задачах молекулярного разделения, идентификации и количественного определения углеводородов, смол, асфальтенов и гетероорганических соединений. Описаны принципы хроматографического разделения, особенности пробоподготовки, параметры колонок и детекторов, применяемых при анализе сложных нефтяных систем. Рассмотрены примеры практического применения хроматографии в

паспортизации нефти, контроле качества нефтепродуктов, исследовании стабильности фракций, а также в области petroleomics — глубокой молекулярной аналитики тяжёлых нефтей. Подчёркивается роль хроматографии как ключевого аналитического инструмента в современной нефтехимии, способствующего повышению точности, селективности и научной обоснованности технологических решений.

**Ключевые слова:** нефть, хроматография, газовая хроматография, жидкостная хроматография, гель-проникающая хроматография, асфальтены, смолы, petroleomics, анализ углеводородов, контроль качества.

**Abstract:** this review article presents a comprehensive overview of chromatographic methods used for the analysis of crude oil components. Particular attention is paid to the development and application of gas chromatography (GC), liquid chromatography (LC), and gel permeation chromatography (GPC) in the separation, identification, and quantification of hydrocarbons, resins, asphaltenes, and heteroorganic compounds. The article outlines the physicochemical principles of chromatographic separation, features of sample preparation, and specifications of detectors and columns used for complex petroleum matrices. Practical examples of chromatography application are examined, including crude oil fingerprinting, quality control of petroleum products, fraction stability evaluation, and the field of petroleomics—deep molecular analysis of heavy crude oils. The review emphasizes the role of chromatography as a key analytical tool in modern petroleum chemistry, contributing to the accuracy, selectivity, and scientific justification of technological solutions.

**Keywords:** crude oil, chromatography, gas chromatography, liquid chromatography, gel permeation chromatography, asphaltenes, resins, petroleomics, hydrocarbon analysis, quality control.

## Введение (Introduction)

Нефть — это сложнейшая многокомпонентная природная смесь,

включающая в себя углеводороды различной степени насыщенности (парафины, нафтины, аренов), а также значительное количество гетероорганических соединений, содержащих атомы серы, азота, кислорода, металлов. На молекулярном уровне состав нефти характеризуется исключительно высокой гетерогенностью как по массе, так и по функциональной структуре компонентов. В условиях современных задач разведки, переработки и транспортировки нефти — детальное компонентное и фракционное исследование её состава приобретает фундаментальное значение [1,2].

Среди всех аналитических методов, применяемых в нефтехимии, хроматография занимает особое место как наиболее чувствительный, селективный и универсальный подход к качественному и количественному анализу. В отличие от традиционных методов фракционирования (дистилляция, экстракция, осаждение), хроматографические методы обеспечивают молекулярно-уровневое разрешение состава нефтяных систем, включая распределение по углеродному числу, по структуре (нормальные, разветвлённые, циклические соединения), по классовой принадлежности (парафины, аренов, гетеросоединения) и по молекулярной массе [3].

Современные хроматографические технологии (газовая хроматография, высокоэффективная жидкостная хроматография, гель-проникающая хроматография, двумерная хроматография, хромато-масс-спектрометрия) не только решают задачи аналитического контроля качества нефти и нефтепродуктов, но и являются неотъемлемой частью исследований в области petroleomics — науки о молекулярном составе нефти [4].

Систематический хроматографический анализ даёт возможность:

- оценивать стабильность и деградацию нефти при хранении,
- диагностировать присутствие проблемных компонентов (смол, асфальтенов, полиароматов),
- определять профиль нефтяных фракций при термокатализитической переработке,

- классифицировать нефть по генетическому и технологическому признаку,
- управлять составом при разработке ингибиторов, добавок, эмульгаторов и депрессорных присадок [5].

Настоящая обзорная работа направлена на систематизацию основных направлений, методов и практик хроматографического анализа нефти, с фокусом на физико-химические принципы разделения, методологию, аналитическую чувствительность и прикладную значимость каждого подхода в контексте нефтехимии.

## **2. Материалы и методы исследования (Materials and Methods)**

### **2.1 Теоретические основы хроматографии**

Хроматография как метод молекулярного разделения основана на различии скоростей движения компонентов смеси между подвижной фазой (газ или жидкость) и неподвижной фазой (твёрдая или жидкая, зафиксированная на носителе). При прохождении пробы через колонку с сорбентом каждый компонент распределяется между фазами в соответствии со своей физико-химической природой — полярностью, молекулярной массой, сродством к сорбенту — и, соответственно, имеет индивидуальное время удерживания.

Первоначально термин «хроматография» был предложен М.С. Цветом в 1906 году, а его метод получил развитие в нефтехимии в середине XX века с появлением газовых и жидкостных колонн, способных разделять сложные многокомпонентные смеси [1].

Современная хроматография включает несколько фундаментальных разновидностей:

- Газовая хроматография (ГХ) — подвижная фаза газ, анализируются легкие углеводороды (C<sub>1</sub>–C<sub>30</sub>).
- Жидкостная хроматография (ЖХ/ВЭЖХ) — подвижная фаза жидкость, применяется для анализа смол, асфальтенов, ароматических фракций.

- Гель-проникающая хроматография (GPC/SEC) — основана на разделении молекул по размерам, применяется для оценки молекулярной массы.
- Ионообменная и распределительная хроматография — специализированные методы для анализа кислородсодержащих, сернистых и азотистых соединений.

Хроматографический процесс характеризуется несколькими важными параметрами:

- Коэффициент распределения K:

$$K = \frac{C_s}{C_m}$$

где  $C_s$  — концентрация вещества в неподвижной фазе,  $C_m$  — в подвижной. Чем выше K, тем дольше задерживается вещество в колонке.

Фактор удерживания  $k'$ :

$$k' = \frac{t_R - t_0}{t_0}$$

где  $t_R$  — время удерживания вещества,  $t_0$  — время «мертвой зоны».

Эффективность колонки — оценивается числом теоретических тарелок N, которое отражает качество разделения:

$$N = 16 \left( \frac{t_R}{W} \right)^2$$

где W — ширина пика на уровне основания.

Разрешающая способность (Resolution,  $R_s$ ) — описывает способность колонки разделить два близкорасположенных пика:

$$R_s = \frac{2(t_{R2} - t_{R1})}{W_1 + W_2}$$

Принципы хроматографии применимы как к летучим, так и к нелетучим компонентам нефти. Для высокомолекулярных фракций, таких как смолы и асфальтены, приоритетными являются жидкостные методы, в то время как для

легких углеводородов (C<sub>1</sub>–C<sub>10</sub>) наилучшие результаты даёт газовая хроматография с пламенно-ионизационным детектором (ПИД) [2, 3].

Химическая природа сорбента (полярность, кислотность, наличие функциональных групп) и температура колонны оказывают решающее влияние на степень удерживания веществ. Наиболее распространённые неподвижные фазы — это силикагель, алюмосиликаты, активированный уголь, а в случае ЖХ — силика с модифицированными цепями (C<sub>18</sub>, фенил, аминопропил и др.) [4].

Таким образом, хроматография предоставляет высокоточный инструмент для аналитической и технологической нефтехимии, позволяя разложить сложнейшую смесь — сырую нефть — на десятки, сотни, а при глубокой обработке и тысячи индивидуальных компонентов, не разрушая их структуры.

### **3. Газовая хроматография в анализе компонентов нефти**

Газовая хроматография (ГХ) — один из наиболее широко используемых методов анализа углеводородов в нефтехимии. Благодаря высокой разрешающей способности, чувствительности и воспроизводимости, ГХ позволяет разделять и идентифицировать широкий спектр компонентов нефти: от легких парафинов до полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).

Принцип метода заключается в переносе пробы в поток инертного газа (обычно азот, гелий или водород), который проходит через хроматографическую колонку, заполненную неподвижной фазой. Компоненты смеси взаимодействуют с сорбентом и разделяются по скорости перемещения в колонке. Разделённые вещества фиксируются с помощью чувствительных детекторов, обеспечивающих как качественный, так и количественный анализ.

В нефтехимии газовая хроматография применяется преимущественно для анализа следующих объектов:

- Бензиновые и дизельные фракции нефти

Позволяет точно определить содержание н-алканов, изоалканов, аренов (в том числе бензола, толуола, ксилола), нафтенов. Используются неполярные капиллярные колонки (например, на основе 100 % диметилполисилоксана) и ПИД-детектор, обладающий высокой чувствительностью к углеводородам [1].

- Лёгкие газы и фракции С1–С4

Применяется ТСД-детектор (теплопроводностной) и криогенная подготовка пробы. Метод широко используется для анализа газов из скважин, попутного газа, растворённого газа в нефти [2].

- Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)

Их определение возможно при использовании колонок с повышенной температурной устойчивостью и предварительной экстракции из нефти. Применение газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) позволяет достоверно идентифицировать такие соединения, как фенантрен, пирен, бенз(а)пирен и др. [3].

- Групповой углеводородный анализ

Согласно ГОСТ Р 51329 и ASTM D5134, ГХ позволяет определить массовую долю:

- н-алканов,
- изоалканов,
- циклоалканов,
- аренов (моно-, ди- и полиароматов) — с точностью до  $\pm 0,5\%$  от массы фракции.

Технологически газовая хроматография включает несколько стадий:

1. Пробоподготовка — включает фильтрацию, экстракцию, дегазацию, концентрирование, часто с применением сорбентов (Tenax, Porapak, активированный уголь).

2. Ввод пробы — реализуется через автосамплер или вручную, в жидкой или газовой фазе.

3. Разделение — происходит в колонке (длина 15–60 м, внутренний диаметр 0,25–0,53 мм).

4. Детектирование — осуществляется ПИД, TCD, ECD (электронозахватный детектор) или масс-спектрометром.

Согласно данным отраслевых регламентов и производственных лабораторий, газовая хроматография применяется для паспортизации товарной нефти, контроля качества НП (бензина, керосина, дизеля), оценки деградации фракций при окислении, а также в задачах геохимической корреляции при разведке месторождений.

Таким образом, ГХ является универсальным методом для компонентного анализа лёгких и среднетемпературных нефтяных фракций. Её возможности расширяются при интеграции с масс-спектрометрией и автоматизированной обработкой данных, формируя основу для развития petroleomics — молекулярной аналитики нефти.

#### **4. Жидкостная хроматография в анализе тяжёлых компонентов нефти**

Жидкостная хроматография (ЖХ), особенно в формате высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ, HPLC), является ключевым инструментом в анализе тяжёлых и неполярных фракций нефти, таких как смолы, асфальтены, полиароматические соединения, а также гетероорганические компоненты с содержанием серы, азота и металлов.

В отличие от газовой хроматографии, метод ЖХ не требует испарения компонентов и обеспечивает мягкие условия анализа, что особенно важно для термолабильных и высокомолекулярных веществ, таких как асфальтены. Основу метода составляет разделение веществ по их сродству к неподвижной фазе, где подвижная фаза — органический растворитель или их смесь (гексан, толуол, хлороформ, ацетон и др.).

##### **4.1. Разделение смол и асфальтенов**

ВЭЖХ позволяет эффективно разделять компоненты нефти по полярности и молекулярной массе. Типичная схема фракционирования включает:

- Выделение асфальтенов осаждением н-гексаном;

- Разделение оставшихся компонентов на:
  - насыщенные углеводороды (elution in non-polar phase),
  - ароматические углеводороды,
  - смолы с различной степенью полярности.

Такой подход используется в методике SARA (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes), стандартизированной в ряде ГОСТов и ASTM-методов (например, D2007, D4124), и реализуется с применением колонок с силикагелем или аминопропильными сорбентами.

#### 4.2. Применение обратной фазы (RP-HPLC)

При использовании обратнофазной хроматографии (C18, C8-фазы) разделение идёт на основе гидрофобности компонентов. Это позволяет определять:

- полициклические ароматические углеводороды (ПАУ),
- кислородсодержащие соединения (фенолы, кетоны),
- серосодержащие и гетероциклические компоненты.

Для детектирования используют диодные массивы (DAD/UV), флуоресцентные детекторы, а также масс-спектрометры.

#### 4.3. Анализ металлических комплексов и координационных структур

Методы ионной ЖХ и комплексонометрической ВЭЖХ применяются для анализа:

- ванадилпорфиринов,
- никельсодержащих соединений,
- координационных комплексов с серой и азотом.

Такой анализ важен при изучении каталитической активности и устойчивости сырья к переработке, а также для прогнозирования скорости коксообразования и выхода деструктивных продуктов.

#### 4.4. Хроматографическая фингерпринтинг-технология

Использование ВЭЖХ в режиме "отпечатка" позволяет формировать уникальный профиль тяжелых компонентов нефти. Это особенно важно в:

- задачах идентификации генетического происхождения нефти,

- контроле стабильности и качества нефти при хранении,
- исследованиях состаривания и деградации нефтяных систем.

Современные системы позволяют сочетать двумерную ЖХ, масс-спектрометрию и дифференциальное сканирование для глубокой структурной аналитики, что составляет основу развивающейся области petroleomics.

ЖХ стала основным методом, когда требуется мягкое, селективное и высокочувствительное разделение тяжёлых фракций нефти, где невозможна или ограничена газовая хроматография. Её универсальность и совместимость с масс-спектрометрическими и спектральными детекторами делают её незаменимой для исследования наиболее сложных классов соединений — от смол и асфальтенов до координационных комплексов и нестабильных коллоидных систем.

## **5. Гель-проникающая хроматография (GPC/SEC) в оценке молекулярной массы нефтяных компонентов**

Гель-проникающая хроматография (GPC), также известная как хроматография эксклюзии по размеру (SEC), является специализированным методом для разделения веществ по молекулярной массе и размеру молекул в растворе. Это один из немногих методов, позволяющих получить данные о молекулярно-массовом распределении (ММР) тяжёлых компонентов нефти — прежде всего смол и асфальтенов, а также их агрегатов и надмолекулярных комплексов.

### **5.1. Принцип метода**

Разделение основано не на химическом сродстве веществ к сорбенту, а на механическом проникновении молекул в поры гелевого наполнителя. Более крупные молекулы не проникают в поры сорбента и выходят из колонки первыми, в то время как мелкие задерживаются дольше. Таким образом, элюция происходит в порядке уменьшения молекулярного размера.

Сорбенты: пористые гели на основе полистирол-дивинилбензола (PS-DVB), силикагели, полиакрилаты, со строго калиброванным размером пор (обычно от 10 до 100 нм).

Растворители: толуол, хлороформ, тетрагидрофуран (THF), иногда декалин — в зависимости от природы исследуемых компонентов.

## 5.2. Применение GPC в нефтехимии

Метод применяется для оценки:

- молекулярной массы асфальтенов (обычно 600–3000 г/моль);
- полидисперсности (коэффициент распределения массы:  $M_w/M_n$ );
- характеристик ассоциатов и агрегатов в растворах;
- изменения структуры при воздействии температуры, УЗО, катализаторов.

Для количественной калибровки используют полистирольные стандарты, а интерпретация результатов требует учёта различий в конфигурации молекул (жёсткие, ветвистые, глобулярные и др.).

Детекторы:

- рефрактометрический (RI),
  - УФ-детектор (UV),
  - дифференциальный вискозиметр,
  - многозонный светорассеяние (MALS) для абсолютного  $M_w$ .

## 5.3. Примеры использования

- В работах по термодеструкции и гидрокрекингу GPC позволяет отслеживать уменьшение молекулярной массы продуктов [1].
- В petroleomics метод используется совместно с массспектрометрией (GPC-MS) для деконволюции смесей сверхвысокой сложности.
- При изучении агрегации асфальтенов GPC показывает наличие как мономерных, так и агрегированных форм в диапазоне от 500 до 10 000 г/моль, что невозможно установить иными методами.

## 5.4. Достоинства и ограничения

Преимущества:

- Определение распределения по размерам и массам;
- Мягкие условия элюции, без термической деструкции;

- Возможность работы с тяжелыми и слабо летучими компонентами.

Ограничения:

- Зависимость от растворимости и природы взаимодействия молекул с подвижной фазой;
- Не всегда соответствует реальным массам в нефти из-за агрегации;
- Требует высокой чистоты пробы и селективной пробоподготовки.

Таким образом, GPC/SEC дополняет газовую и жидкостную хроматографию, позволяя получить уникальные данные о молекулярной архитектуре и полидисперсности тяжёлых компонентов нефти. В сочетании с методами DLS, AFM и масс-спектрометрии GPC составляет основу молекулярной аналитики высокомолекулярных фракций, таких как асфальтены и смолы.

## **6. Особенности пробоподготовки и аналитических условий в хроматографическом анализе нефти**

Нефть, как объект хроматографического анализа, представляет собой физико-химически сложную матрицу, включающую летучие, нелетучие, полярные и аполярные соединения, твёрдые и коллоидные фазы. Поэтому пробоподготовка и выбор условий хроматографирования имеют первостепенное значение для получения достоверных, воспроизводимых и репрезентативных результатов.

### **6.1. Пробоподготовка: цели и этапы**

Цель пробоподготовки — обеспечить совместимость пробы с хроматографической системой и отделить аналитически значимые фракции от мешающих примесей, смол, осадков и водной фазы.

Основные этапы пробоподготовки:

- Фильтрация (обычно через мембранны 0,45–1 мкм) — удаление твёрдых механических включений и капель воды.

- Осаждение асфальтенов — добавление избытка н-гексана или гептана (соотношение нефть:алкан 1:40), выдержка 24 ч, центрифугирование.
- Экстракция целевых фракций — с применением органических растворителей (метанол, толуол, хлороформ, ацетон).
- Удаление воды и летучих примесей — вакуумная сушка, дегазация азотом, центрифугирование.
- Разбавление и стандартизация концентрации — обычно до 1–10 мг/мл для ЖХ, 0,1–1 мкл для ГХ.

Важнейшим элементом подготовки является обеспечение растворимости компонентов в выбранной подвижной фазе. Например, асфальтены полностью растворяются в ароматических растворителях (толуол, хлоробензол), но нерастворимы в алканах. Смолы — промежуточный класс, чувствительный к условиям экстракции и ионности среды.

## 6.2. Особенности хроматографического анализа нефти

Температурные условия:

- В ГХ — программируемый температурный градиент (обычно от 40 °C до 300 °C), в зависимости от летучести фракций.
- В ЖХ и GPC — терmostатирование колонок (25–40 °C) для стабилизации вязкости растворителя и давления.

Сорбенты и колонки:

- Для ГХ: полисилоксановые и цианофениловые фазы (например, DB-1, DB-5, RTX-1701);
- Для ЖХ: силикагель, C18, NH<sub>2</sub>, диол-фазы;
- Для GPC: пористые полистирольные гели с узким распределением пор.

Детекторы:

- ПИД (пламенно-ионизационный детектор): наиболее чувствителен к углеводородам;
- TCD (теплопроводностной): универсален, но менее чувствителен;

- UV/DAD: эффективен для ароматических и окрашенных соединений;
- Масс-спектрометр (MS): обеспечивает структурную идентификацию и применяется для анализа ПАУ и следовых примесей.

Валидация и калибровка:

- Используются стандартные смеси углеводородов (например, C6–C36 n-алканы);
- Осуществляется построение калибровочных кривых, контроль стабильности пиков, повторности удерживания и площади.

### 6.3. Стандартизация и нормативные документы

В практике хроматографического анализа нефти используются международные и российские стандарты, включая:

- ГОСТ Р 51776–2001 — метод определения углеводородного состава бензинов методом ГХ;
- ГОСТ Р 52995–2008 — ЖХ-метод определения полиароматических углеводородов в дизельных топливах;
- ASTM D2007, D4124 — методики SARA-фракционирования;
- ISO 3838, ISO 3405 — методы определения фракционного состава.

Таким образом, грамотная пробоподготовка и корректный выбор аналитических условий являются необходимыми предпосылками для точного и воспроизводимого хроматографического анализа нефти и её производных. Эти процедуры позволяют обеспечить селективность и надёжность результатов, особенно в условиях многокомпонентности и полидисперсности нефтяной матрицы.

## 7. Применение хроматографии в нефтехимии: от контроля качества до petroleomics

Хроматографический анализ давно стал неотъемлемым инструментом нефтехимии — как в научных исследованиях, так и в прикладной промышленной практике. Наибольшую значимость он приобретает в задачах идентификации состава нефти, контроля стабильности и качества

нефтепродуктов, а также при оценке поведения фракций в процессе переработки и хранения.

Одной из ключевых сфер применения является формирование хроматографического «отпечатка» (фингерпринта) нефти. Он представляет собой уникальный профиль распределения компонентов, полученный, как правило, методом ГХ, и позволяет однозначно идентифицировать месторождение, партию или источник загрязнения. Такие отпечатки широко применяются при геохимической корреляции пластов, в экологической криминалистике (определение источников разлива), а также для отслеживания изменений состава при транспортировке и хранении.

В технологическом контроле хроматография используется для паспортизации нефти: определения группового состава (н-алканы, изоалканы, аренов, нафтены), содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), сернистых, кислородсодержащих и азотистых соединений. Такой анализ позволяет прогнозировать поведение нефти в процессе переработки: склонность к коксообразованию, индекс цетанового/октанового числа, стабильность при хранении, риск образования осадков и АСПО.

В задачах переработки и каталитических процессов хроматография обеспечивает контроль за изменением состава фракций при гидрокрекинге, гидрообессеривании, ароматизации и других процессах. Использование онлайн-хроматографов в технологических линиях даёт возможность в реальном времени отслеживать эффективность реакций и качество продукта.

Современное направление — petroleomics — представляет собой углубленный молекулярный анализ нефти, основанный на сочетании двумерной газовой хроматографии ( $GC \times GC$ ), высокоразрешающей массспектрометрии (FT-ICR MS) и гель-проникающей хроматографии (GPC). Такие исследования позволяют рассматривать нефть не как смесь фракций, а как совокупность десятков тысяч отдельных молекул, сгруппированных по классовым признакам (например, N1S1O0 — азотисто-сернистые

соединения). Это открывает новые горизонты в рациональной переработке и персонализированном управлении ресурсом тяжёлых, высокосмолистых и трудноизвлекаемых нефей.

Хроматографический подход также является основой в разработке добавок и присадок. Например, при исследовании депрессорных присадок к дизельному топливу ВЭЖХ позволяет оценить эффективность снижения содержания парафинов в фракции. Для ингибиторов коррозии и стабилизаторов асфальтенов хроматография даёт возможность оценить распределение функциональных групп и сродство к фазам нефти [8].

Таким образом, хроматография в нефтехимии — это не просто аналитический метод, а универсальный научно-технологический инструмент, который обеспечивает точную диагностику, прогнозирование свойств, оптимизацию процессов и фундаментальные исследования структуры нефти. Её значимость только возрастает в условиях разработки трудноизвлекаемых запасов, ужесточения требований к качеству топлива и перехода к молекулярному проектированию процессов переработки.

## **Заключение (Conclusions)**

Хроматография занимает центральное место в современном аналитическом инструментариуме нефтехимии, обеспечивая молекулярно-точное разделение, идентификацию и количественную оценку компонентов нефти и нефтепродуктов. В отличие от классических фракционных методов, она позволяет рассматривать нефть не как макроскопическую смесь, а как совокупность четко определяемых молекул, сгруппированных по структурным, функциональным и физико-химическим признакам.

Показано, что различные формы хроматографии — газовая, жидкостная, гель-проникающая — обладают собственной специфичностью, детекторной базой и методологией подготовки проб. В совокупности они охватывают весь диапазон молекулярных масс и полярностей нефтяных компонентов — от легких углеводородов С1–С10 до ассоциатов смол и асфальтенов.

Газовая хроматография доказала свою эффективность в анализе лёгких фракций, контроле качества топлива и построении хроматографических паспортов. Жидкостная хроматография обеспечивает точное фракционирование тяжёлых компонентов, включая ароматические, гетероорганические и металлогорганические соединения. Гель-проникающая хроматография дополняет этот арсенал оценкой молекулярно-массового распределения, что критично для анализа ассоциатов и коллоидных форм.

Особое внимание уделено важности пробоподготовки, стандартизации методов и применению хроматографических данных в задачах petroleomics — глубокой молекулярной аналитики нефти. Рассмотрены перспективы использования двумерной ГХ, масс-спектрометрии, хромато-NMR и хромато-визуализации как будущих направлений аналитики.

Таким образом, хроматография в нефтехимии — это не просто метод, а полноценная платформа для научного исследования, контроля качества, рационального управления процессами и стратегического развития нефтяной отрасли в условиях всё более сложного состава и поведения нефтей XXI века.

### **Список литературы (References)**

1. Цвет М.С. Новые методы растительного анализа / М.С. Цвет // Журнал Русского физико-химического общества. – 1906. – Т. 38. – С. 621–623.
2. Спейт Д.Г. Химия и технология нефти / Д.Г. Спейт. – М.: Техносфера, 2008. – 864 с.
3. Винокуров В.А., Левин С.Я. Физико-химический анализ нефти / В.А. Винокуров, С. Я. Левин – М.: Недра, 1996. – 232 с.
4. ГОСТ Р 52714-2018. Бензины автомобильные. Определение индивидуального и группового состава методом капиллярной газовой хроматографии: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 мая 2018 г. N 262-ст : введен впервые : дата введения 2019-07-01 / разработан Акционерным

обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти» (АО «ВНИИ НП), Публичным акционерным обществом «ЛУКОЙЛ» ( ПАО «ЛУКОЙЛ»). – Москва : Стандартинформ, 2018. — 14 с.

5. ГОСТ 31872-2019. Нефтепродукты жидкие. Определение группового углеводородного состава методом флуоресцентной индикаторной адсорбции : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 мая 2018 г. N 781-ст : введен впервые : дата введения 1999-28-12 / разработан Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств (ТК 30) и Техническим комитетом по стандартизации "Электрооборудование жилых и общественных зданий" (ТК 337) . – Москва : Стандартинформ, 2019. — 7 с.

6. ASTM D2007 – Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method

7. ASTM D4124–09. Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. – ASTM International.

8. Mullins O.C. The Asphaltenes and Petroleomics. – Springer, 2007. – 364 p.

9. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum Formation and Occurrence. – Berlin: Springer-Verlag, 1984. – 699 p.

10. González G., et al. Effect of solvents on the structure of asphaltenes by DLS and SANS // Fuel. – 2006. – Vol. 85, No. 12. – P. 1811–1818.

11. Acevedo S., et al. AFM characterization of asphaltene aggregates // Energy & Fuels. – 2004. – Vol. 18, No. 5. – P. 1457–1463.

12. Rogel E. Aggregation and phase behavior of asphaltenes in hydrocarbon media // Fuel. – 2000. – Vol. 79, No. 7. – P. 813–821.