



Утилизация и биodeградация отходов

УДК 665.63:628.54:547.68

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26104

Ресурсосберегающая конверсия нефтегазохимических отходов в сырье для получения тетрацена и его гомологов

Т. В. Драбкова¹✉, С. М. Турабджанов¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан,
e-mail: tatyana111183@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.12.2025 г.; после доработки: 02.04.2026 г.; принята в печать: 07.04.2026 г.

Аннотация – В условиях растущего спроса на инновационные подходы к управлению промышленными отходами нефтегазовой отрасли предлагается стратегия преобразования смолистых продуктов пиролиза в ценные химические компоненты. Основное внимание уделено утилизации дегтеобразных материалов, образующихся на Устюртском газохимическом комплексе в Каракалпакстане (СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical»). Разработана последовательность операций фракционированной вакуумной дистилляции для выделения тетрацена – полициклического ароматического углеводорода (ПАУ) – и его гомологов (метил- и этилтетраценов). Метод обеспечивает выход целевой фракции до 7,2% мас. от исходного сырья, минимизируя экологические риски и повышая ресурсную эффективность. Полученные результаты подтверждают перспективность использования вторичного сырья для последующего синтеза амфолитных сорбентов, применяемых в очистке водных сред, что способствует устойчивому развитию региона.

Ключевые слова: пиролизные остатки, тетрацен, гомологи, амфолитные сорбенты, вторичное сырье, нефтегазовые отходы.

Utilization and biodegradation of wastes

UDC 665.63:628.54:547.68

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26104

Resource-efficient conversion of petrochemical waste into feedstock for the production of tetracene and its homologues

Tatyana V. Drabkova¹✉, and Sadritdin M. Turabdzhanov¹

¹Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: tatyana111183@mail.ru

Received: December 5, 2025; Revised: April 2, 2026; Accepted: April 7, 2026

Abstract – In the context of growing demand for innovative approaches to industrial waste management in the oil and gas sector, a strategy for converting tarry pyrolysis by-products into valuable chemical components is proposed. The study focuses on the utilization of tar-like materials generated at the Ustyurt Gas-to-Chemicals Complex in the Republic of Karakalpakstan (Uz-Kor Gas Chemical JV LLC). A sequential process involving fractionated vacuum distillation has been

developed to isolate tetracene – a polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) – and its homologues (methyl- and ethyltetracenes). The method provides a yield of the target fraction of up to 7.2% wt. relative to the initial feedstock, while minimizing environmental risks and enhancing resource efficiency. The obtained results confirm the potential of secondary raw materials for the subsequent synthesis of ampholytic sorbents used in the treatment of aqueous media, thereby contributing to the sustainable development of the region.

Keywords: pyrolysis residues, tetracene, homologues, ampholytic sorbents, secondary raw materials, oil and gas waste.

ВВЕДЕНИЕ

Современные экологические проблемы и необходимость бережного использования ресурсов требуют поиска эффективных решений для переработки побочных продуктов промышленности.

В нефтегазовом комплексе Узбекистана, где добыча и переработка углеводородов составляют важную основу экономики, ежегодно образуются значительные объемы смолистых веществ – результат термического разложения сырья. Эти материалы, часто классифицируемые как отходы, содержат потенциально полезные соединения, способные стать основой для новых технологий.

Особое внимание уделяется Устюртскому газохимическому комплексу СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical», расположенному в Каракалпакстане [1]. Созданный в 2008 году как совместное предприятие «Узбекнефтегаз» и корейского консорциума, комплекс специализируется на глубокой переработке природного газа из месторождений Сургиль, Восточного и Северного Бердах. Ежегодная мощность более 3,0 млрд м³ газа, из которых производится 387 тыс. тонн полиэтилена, 83 тыс. тонн полипропилена, 102 тыс. тонн пиролизного дистиллята и 8 тыс. тонн пиролизного масла. Процесс включает газоразделение и пиролиз, где газоконденсат фракционируется на метан, этан, сжиженный газ и конденсат, а затем направляется в печь для получения олефинов. Однако на этом этапе неизбежно формируются тяжелые фракции – смолистые остатки, известные как «пиролизное масло» или дегтеобразный продукт – именуемый тар-продуктом (рис. 1) [2, 3].

По данным исследований, эти остатки представляют собой вязкую массу темно-коричневого или зеленоватого оттенка с резким ароматом, содержащую ароматические углеводороды, гетероциклы и высокомолекулярные соединения [2, 3]. В Узбекистане нефтегазовый сектор ежегодно генерирует большие объемы смолистых пиролизных остатков (около 21 тонны в сутки), требующие срочных мер по переработке. Традиционные методы утилизации, включая сжигание или захоронение, не только неэффективны, но и усугубляют проблемы загрязнения, особенно в аридном климате Каракалпакстана, где экосистема уязвима к антропогенному воздействию.

Предлагаемый подход ориентирован на конверсию этих остатков в ресурс для синтеза амфолитных сорбентов – материалов с двусторонней ионной активностью, идеальных для удаления загрязнителей из стоков в процессе

очистки сточной воды предприятий [4, 5]. Центральным элементом становится тетрацен, четырехкольцевой ПАУ, извлекаемый из тяжелых фракций. Его применение позволяет снизить зависимость от импортных реагентов, стоимость которых высока из-за дефицита. В контексте глобальных тенденций к циркулярной экономике такая трансформация не только минимизирует отходы, но и усиливает химическую безопасность производства, предотвращая утечки токсичных веществ.

В настоящей работе разработана и экспериментально обоснована ресурсосберегающая технология последовательной фракционированной вакуумной дистилляции (15–20 кПа) с последующей низкотемпературной кристаллизацией. Ресурсосбережение достигается за счет вовлечения 59 % отходов в полезные продукты вместо традиционного захоронения или сжигания, при минимальных технологических потерях (1 %) и возможности полной конверсии кубового остатка в технический углерод или битумные материалы. Экологическая и экономическая целесообразность процесса подтверждена экспериментальными данными и соответствует принципам циркулярной экономики [6, 7].

Выбор тетраценовой фракции в качестве сырья для синтеза амфолитных сорбентов обоснован ее структурными особенностями: развитой плоской конденсированной ароматической системой ($C_{18}H_{12}$ и алкилгомологи), которая после направленной функционализации (введение катионообменных и анионообменных групп) обеспечивает формирование полимерной матрицы с высокой химической и термической стабильностью. Получаемые амфолитные сорбенты сочетают свойства обоих типов ионообменников и позволяют в одном цикле эффективно удалять из воды разнородные ионные примеси (катионы тяжелых металлов, анионы хлоридов, сульфатов, карбонатов). Это особенно важно для ультратонкой очистки сточных вод предприятий, где даже следовые количества Ca^{2+} , Mg^{2+} , тяжелых металлов и кремниевой кислоты требуют высокоэффективных методов очистки. Амфолитные сорбенты на основе тетраценовой матрицы демонстрируют высокую селективность и емкость именно к ионам-«ядам», превосходя традиционные методы (ионный обмен и обратный осмос) [8, 9]. Таким образом, конверсия тетраценовой фракции превращает технологию утилизации отходов в инновационный процесс создания продукта с высокой добавленной стоимостью для очистки сточных вод предприятий.

Целью работы является демонстрация технологической цепочки по получению тетраценовой фракции (и его гомологов) из пиролизных остатков, с акцентом на ее интеграцию в производство сорбентов для очистки сточных вод и водоподготовки. Это способствует реализации национальных программ по устойчивому развитию в нефтегазовой отрасли Узбекистана.

Глобальные исследования пиролизных отходов подчеркивают их потенциал как источника ПАУ [6, 10]. В Узбекистане аналогичные материалы из тар-продукта анализировались на предмет содержания индена, нафталина и гомологов и др. [11], что позволяет превратить их из балласта в целевой продукт. Традиционно такие остатки перерабатывают пиролизными

установками для получения топлива, газа и кокса. В Центральной Азии, включая Узбекистан, фокус на нефтегазовых проектах, где пиролиз газа приводит к фракциям с высоким содержанием ароматических соединений. Исследования показывают, что вакуумная дистилляция эффективна для разделения на легкие и тяжелые компоненты, минимизируя образование вторичных смол [7].

Для синтеза сорбентов ПАУ, включая тетрацен и его гомологи, используются как мономеры. Амфолитные полимеры на их основе могут демонстрировать высокую селективность к ионам металлов и органике в стоках [5, 12]. В контексте Узбекистана, где стоки загрязнены, такие материалы критичны для безопасности. Отсутствие локальных источников стимулирует разработку на базе местных отходов, как в случае с пироконденсатом, содержащим до 20 % ароматических фракций. Разработанный авторами способ получения аминокарбоксильного амфолита на основе тар-продукта в настоящее время находится на стадии патентования [4].



Рис. 1. Внешний вид тар-продукта (пиролизного дегтя) СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical»

Fig. 1. Appearance of the tar-product (pyrolysis tar) from Uz-Kor Gas Chemical JV LLC

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Смолистый тар-продукт, полученный на СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical», из пиролиза газоконденсата, представляет собой хрупкую черную массу с температурой плавления 60-70°C и кипения 270-280°C. Он растворим в толуоле и хлороформе [2, 3, 11], содержит моно- и полициклические структуры. Для экспериментов использована проба массой 7000 г, измельченная до гранул <1 мм.

Фракционированная вакуумная дистилляция проведена в герметичной системе при 15-20 кПа, контролируемом манометром. Нагрев 5°C/мин >400°C. Фракции собирались по температурам:

I фракция – 50 – 270°C;

II фракция – 270 – 320°C;

III фракция – 320 – 360°C;

IV фракция – 360 – >400°C (целевая).

Полученную фракцию (обогащенная тетраценом ($C_{18}H_{12}$) и его метил- и этилзамещенными гомологами, 630 г) охлаждали до температуры –5 °C и

выдерживали в этих условиях до 48 ч. Образовавшийся кристаллический осадок отфильтровывали под вакуумом, при этом выделяли $503 \pm 3,0$ г кристаллического продукта, представленного преимущественно тетраценом и его алкилзамещенными гомологами (рис. 1).

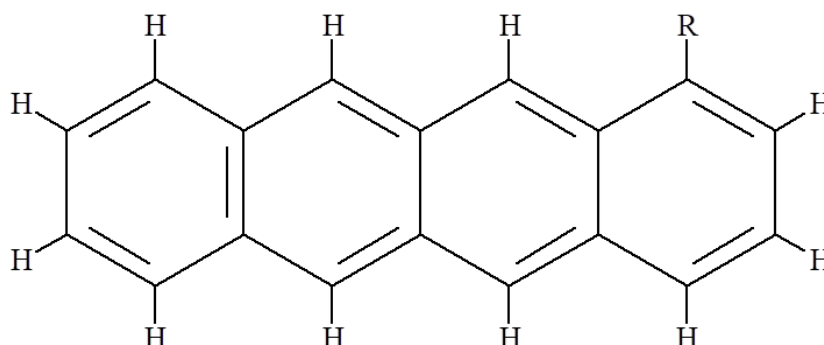


Рис. 1. Структурная формула тетрацена ($R = H$) и алкилзамещенного тетрацена ($R = CH_3, C_2H_5$).

Fig. 1. Structural formula of tetracene ($R = H$) and alkyl-substituted tetracene ($R = CH_3, C_2H_5$).

Расчеты материального баланса и эффективности разделения проведены на основе классического балансового уравнения:

$$\sum m_i + m_k + m_p = m_0 = 7000 \text{ г}$$

где m_i – масса i -й дистилятной фракции, m_k — масса кубового остатка, m_p – технологические потери, m_0 – масса исходного смолистого пиролизного остатка.

Экспериментально подтверждено полное соблюдение баланса с погрешностью $\leq 0,1$ %. Для ключевых пар компонентов в системе получены значения $\alpha = 1,2-1,5$ (± 5 %), что обеспечивает четкое фракционное разделение в выбранных температурных интервалах.

Выход целевой тетраценсодержащей фракции рассчитан по формулам:

$$\eta_{\text{дист}} = \frac{m_{\text{дист}}}{m_0} \cdot 100 \% = \frac{630}{7000} \cdot 100 \% = 9,0 \%$$

$$\eta_{\text{крист}} = \frac{m_{\text{крист}}}{m_0} \cdot 100 \% = \frac{503}{7000} \cdot 100 \% = 7,2 \%$$

Селективность фракционирования оценивали коэффициентом относительной летучести α [6, 13]:

$$\alpha = \frac{P_i}{P_{\text{ср}}}$$

где α – коэффициент относительной летучести (селективности фракционирования), характеризующий эффективность разделения компонентов смеси;

P_i – парциальное давление пара i -го компонента (нафталин, флуорен, антрацен, тетрацен и их гомологи) при заданной температуре и пониженном давлении 15–20 кПа;

P_{cp} – средневзвешенное парциальное давление всех летучих компонентов смеси в паровой фазе.

Парциальные давления P_i рассчитывали по уравнению Антуана [10, 13]:

$$\lg P_i = A_i - \frac{B_i}{C_i + T}$$

где T – температура (°C); A_i , B_i , C_i – эмпирические константы, характерные для каждого вещества. Константы Антуана для индивидуальных ПАУ (нафталин, фенантрен, антрацен, тетрацен) [13] и справочной литературы по физико-химическим свойствам углеводородов [10, 14]. Для метил- и этилзамещенных гомологов тетрацена, отсутствующих в справочных базах, использовали экстраполяцию на основе экспериментальных температур кипения, с применением уравнения Клаузиуса–Клапейрона [14].

Клаузиуса–Клапейрона на основе экспериментально определенных температур кипения [14].

Средневзвешенное давление P_{cp} определяли по правилу аддитивности с учетом мольных долей компонентов в исходном сырье [4, 6]:

$$P_{cp} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_i$$

где x_i – мольная доля i -го компонента в исходном тар-продукте; P_i – его парциальное давление при заданной температуре.

Для ключевых пар компонентов получены значения $\alpha=1,2$ – $1,5$ ($\pm 5\%$), что обеспечивает четкое фракционное разделение в выбранных интервалах. Выход целевой тетраценсодержащей фракции составил 9,0 мас. % (дистиллят) и 7,2 мас. % (кристаллический продукт).

Кубовый остаток (40,00 мас. %) представляет собой нелетучую тяжелую фракцию (>400 °C), состоящую преимущественно из пента- и полициклических ПАУ, асфальтенов и полимеризованных смол; он может быть направлен на производство технического углерода или битумных материалов. Минимальные технологические потери (1,00 %) и высокие значения селективности α подтверждают оптимальность выбранного режима вакуумной дистилляции и высокую воспроизводимость технологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таблица 1 систематизирует результаты фракционной вакуумной дистилляции дегтеобразного тар-продукта. Полученные данные наглядно демонстрируют эффективность предложенного технологического подхода для разделения сложной многокомпонентной смеси (рис. 2, 3). Было выделено четыре дистиллятные фракции в четких температурных интервалах, что свидетельствует о высокой селективности процесса под вакуумом.

Таблица 1. Фракционный состав дегтеобразного продукта вакуумной дистилляции**Table 1.** Fractional composition of the tar-like product from vacuum distillation

Фракция	Компоненты	Температура, °С	Масса, г	Выход, мас. %
I	Нафталин, легкие ПАУ, гетероциклы	50–270	1750	25,0
II	Флуорен, фенантрен, гетероциклы	270–320	1050	15,0
III	Антрацен и гомологи, следы тетрацена	320–360	700	10,0
IV (целевая)	Тетрацен, метил-/этилтетрацены	360–400	630 (дист.); 503 (крист.)	9,0 (дист.); 7,2 (крист.)
Кубовый остаток	Пентациклациклические ПАУ, асфальтены, смолы	>400	2800	40,0
Потери	Испарение, адгезия	50–400	70	1,0
Итого	Полный состав	50–>400	7000	100,0

Ключевым результатом является выделение целевой фракции IV (360–>400°С) с выходом 9,0 % от массы сырья, которая обогащена тетраценом и его гомологами (рис. 3). Последующая низкотемпературная кристаллизация позволила получить концентрированный кристаллический продукт с суммарным выходом 7,2%, что подтверждает практическую применимость метода для извлечения ценных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Полный материальный баланс с погрешностью $\leq 0,1\%$ и минимальные технологические потери (1,0%) подчеркивают технико-экономическую эффективность и воспроизводимость разработанной схемы.

Важным аспектом, обеспечивающим комплексность процесса, является наличие полезных применений для всех полученных фракций, что приближает технологию к безотходной схеме. Легкая фракция I (нафталин и моноциклические ароматические соединения) может быть направлена на нефтехимические производства или использована как компонент жидких топлив. Фракция II (флуорен и фенантрен) представляет интерес для синтеза органических полупродуктов. Фракция III (антрацен и его гомологи) уже исследуется как сырье для ионообменных катионитов [9, 10] и имеет потенциал в производстве красителей. Кубовый остаток (40,0%), состоящий из пента- и полициклических ПАУ, асфальтенов и полимеризованных смол, идентифицирован как перспективное сырье для технического углерода, электродного кокса или модификаторов дорожных битумов [6, 8]. Таким образом, разработанный процесс обеспечивает полную конверсию исходных

отходов в полезные продукты, значительно увеличивая ресурсную эффективность.



Рис. 2. Лабораторная установка для фракционированной вакуумной дистилляции смолистого тар-продукта при остаточном давлении 15–20 кПа

Fig. 2. Laboratory setup for fractionated vacuum distillation of the tar-like product at residual pressure of 15–20 kPa



Рис. 3. Кристаллический продукт тетраценовой фракции, полученный после низкотемпературной кристаллизации при -5°C (масса 503 г).

Fig. 3. Crystalline tetracene fraction obtained after low-temperature crystallization at -5°C (mass 503 g).

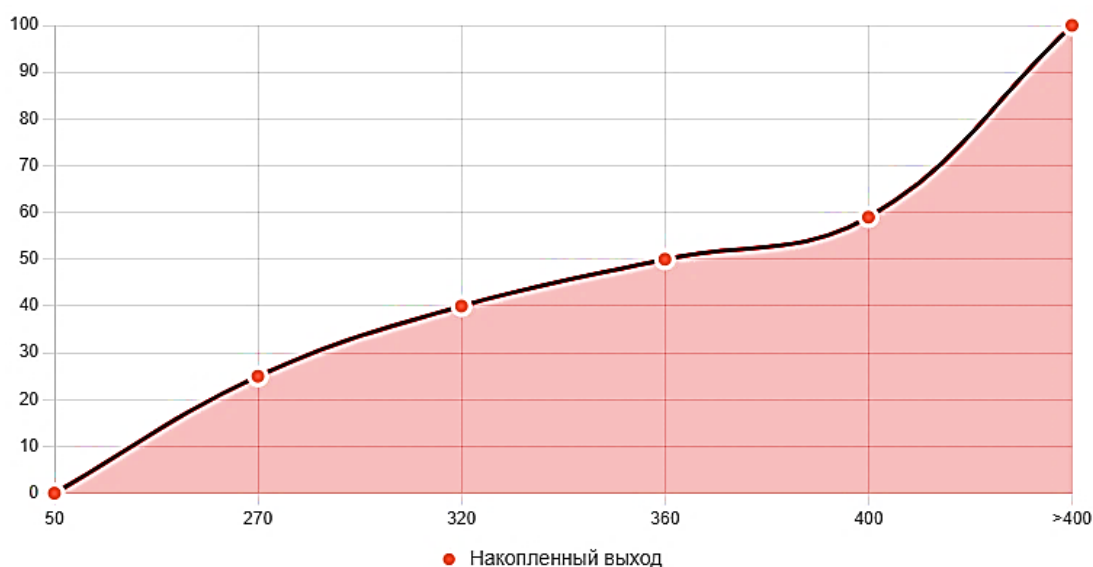


Рис. 4. Кривая вакуумной дистилляции тар-продукта (давление 15–20 кПа; , загрузка 7,0 кг)

Fig. 4. Vacuum distillation curve of the tar-product (pressure 15–20 kPa, load 7.0 kg)

Представленная кривая (рис.4.) (зависимость накопленного выхода фракций от температуры) характеризует кинетику процесса дистилляции. Четко выраженные перегибы на кривой соответствуют температурным интервалам отбора фракций, указанным в Таблице 1. Это подтверждает, что при остаточном давлении 15–20 кПа достигается эффективное разделение компонентов смеси по температурам кипения. Относительно плавный ход кривой в интервалах 270–320 °C и 320–360°C указывает на перегонку сложных

смесей гомологов, в то время как выделенный участок для фракции 360 – $>400^{\circ}\text{C}$ подтверждает концентрирование целевых высококипящих компонентов – тетрацена и его алкилпроизводных.

Кубовый остаток (хвостовая фракция), полученный после отгонки фракции IV при температуре $>400^{\circ}\text{C}$ и остаточном давлении 15–20 кПа, составляет 2800 г (40,00 % мас. от исходного сырья) и представляет собой черную хрупкую смолоподобную массу с температурой размягчения 115–130 $^{\circ}\text{C}$ и коксовым числом 58–62 % (по Конрадсону). Диаграмма визуализирует массовое распределение продуктов дистилляции и подчеркивает два основных потока: суммарный выход дистиллятных фракций (59,0 %), включая целевую, и кубовый остаток (40,0 %). Такое распределение обосновывает комплексный подход к утилизации отхода.

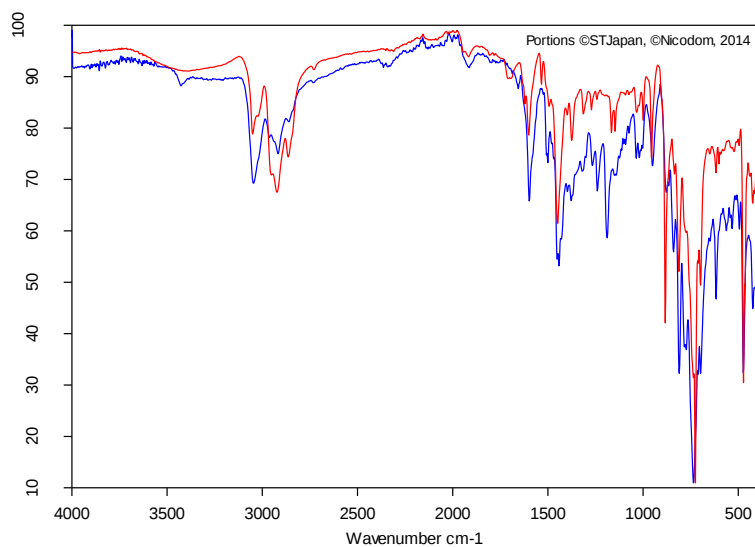
Сравнительный анализ ИК-спектров исходного сырья, обогащенной фракции и индивидуально выделенных продуктов (рис. 5–10) подтверждает эффективность фракционирования и высокую чистоту целевого тетраценового продукта. Спектр исходного тар-продукта (рис. 5) отражает сложный многокомпонентный состав с преобладанием полициклических ароматических структур. Спектр обогащенной фракции (рис. 6) демонстрирует ее обогащение целевыми ПАУ при сохранении следов алкильных гомологов.

Идентичность и чистота выделенного тетрацена (рис. 10) установлены по характерному набору полос, соответствующему линейной конденсированной системе четырех колец (нафтацен). Валентные колебания ароматических C–H связей проявляются при 3070–3080 cm^{-1} , скелетные колебания C=C — в области 1590–1600 cm^{-1} . В ключевой области внеплоскостных деформаций C–H (900–700 cm^{-1}) наблюдается диагностический паттерн: интенсивные полосы около 895 cm^{-1} (колебания изолированных атомов водорода) и 745–720 cm^{-1} (колебания четырех соседних атомов водорода), типичные именно для тетраценового ядра.

Для подтверждения отсутствия примесей проведено прямое сравнение со спектрами индивидуально выделенных антрацена (рис. 9) и фенантрена (рис. 8). Антрацен характеризуется сильными полосами при 883 cm^{-1} и 730 cm^{-1} (линейная система трех колец), фенантрен – при 820 cm^{-1} и 760 cm^{-1} (угловая конденсация). В спектре целевого тетраценового продукта эти полосы отсутствуют, что исключает загрязнение более низкомолекулярными аценами. Минимальная интенсивность алкильных полос (2920–2850 cm^{-1}) в кристаллическом продукте дополнительно свидетельствует о преобладании незамещенного тетрацена над гомологами. Чистота продукта подтверждена также селективной низкотемпературной кристаллизацией (-5°C , 48 ч), основанной на различиях в растворимости и температурах плавления (тетрацен $\approx 357^{\circ}\text{C}$ по литературным данным). Таким образом, ИК-спектроскопия в сочетании с методом выделения однозначно доказывает получение именно тетрацена и его гомологов высокой чистоты.

Search Library

3/2/2025 1:00:10 PM



Compound Name	COAL TAR
Molecular Formula	
Molecular Weight	
CAS Registry Number	
Sample Preparation	ATR single bounce
Reference	FR00207/ FR00207
Copyright	(c) 2014 STJapan Inc.
Entry No.	5597
Library name	ATR-LIB-PHARMA-1-472-2.S01
Library description	ATR-FTIR Pharmaceuticals Library, Vol. 1

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
	424	COAL TAR			

Рис. 5. ИК-спектр исходного тар-продукта.

Fig. 5. IR spectrum of the initial tar-product.

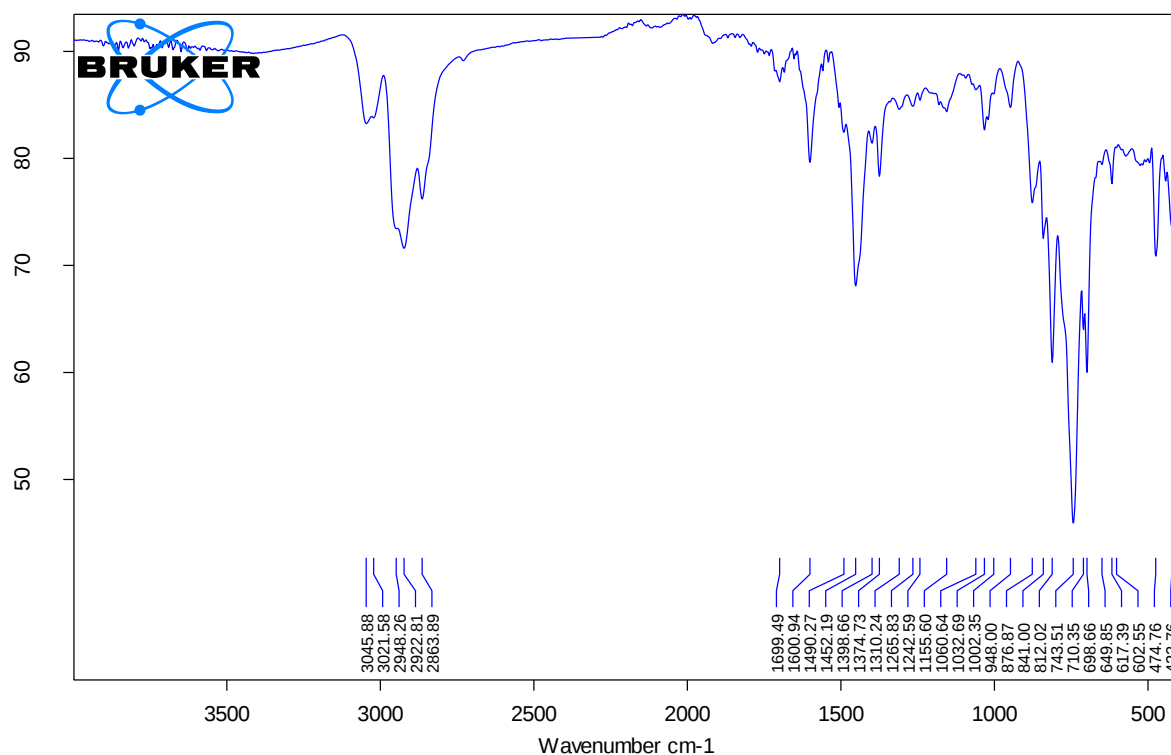


Рис. 6. ИК-спектр фракции, обогащенной тетраценом и его алкилзамещенными гомологами.

Fig. 6. FT-IR spectrum of the fraction enriched with tetracene and its alkyl-substituted homologues.

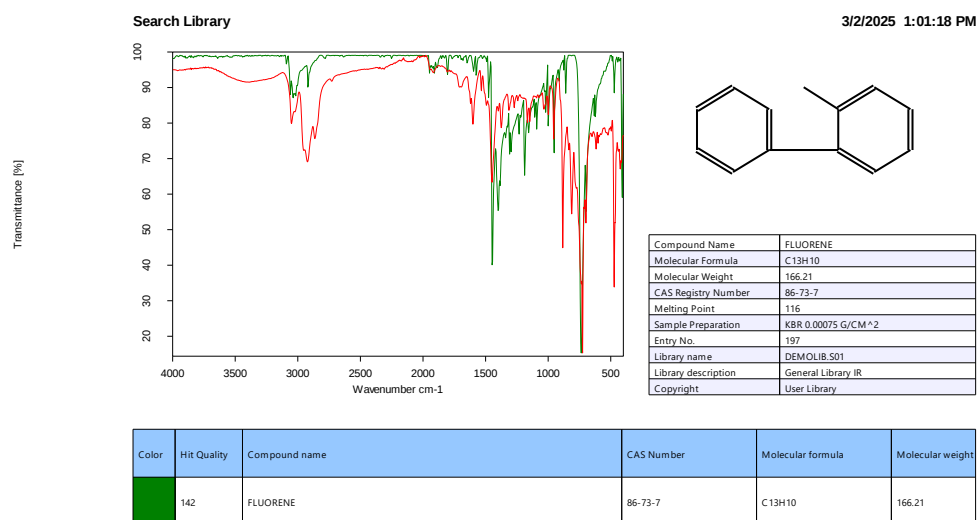


Рис. 7. ИК-спектр выделенного флуорена.

Fig. 7. IR spectrum of the isolated fluorine.

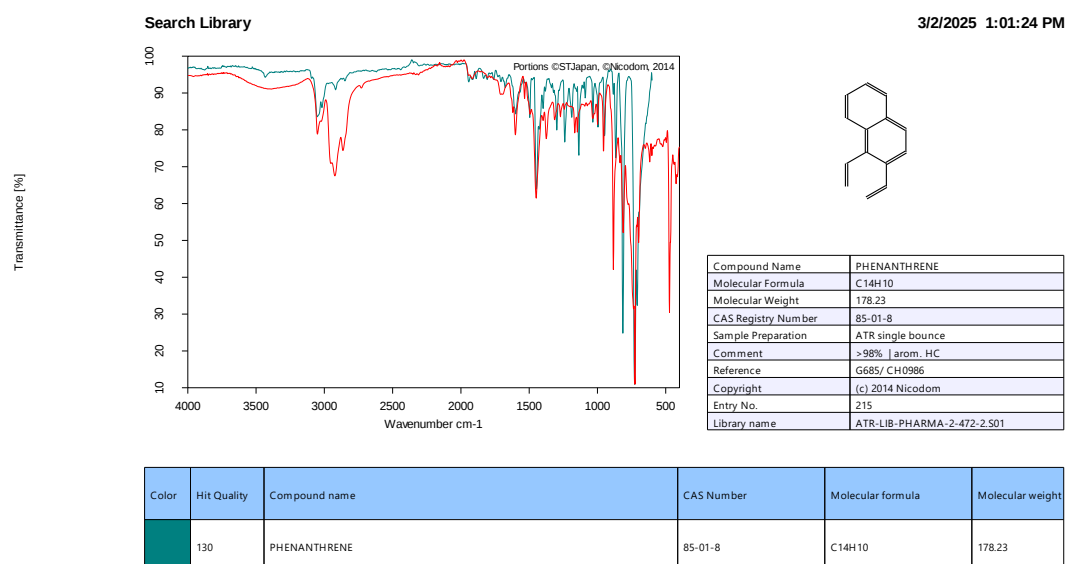


Рис. 8. ИК-спектр выделенного фенантрена.

Fig. 8. IR spectrum of the isolated phenanthrene.

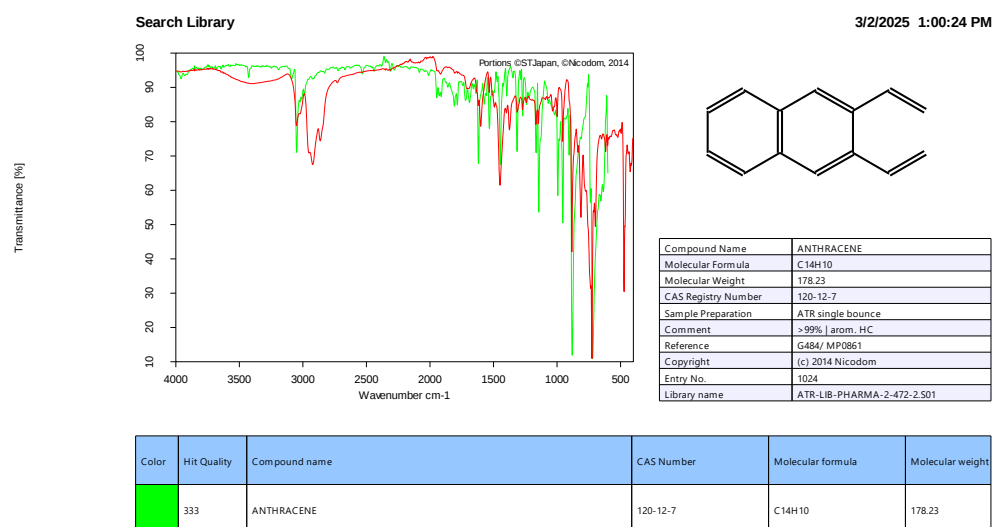


Рис. 9. ИК-спектр выделенного антрацена

Fig. 9. IR spectrum of the isolated anthracene

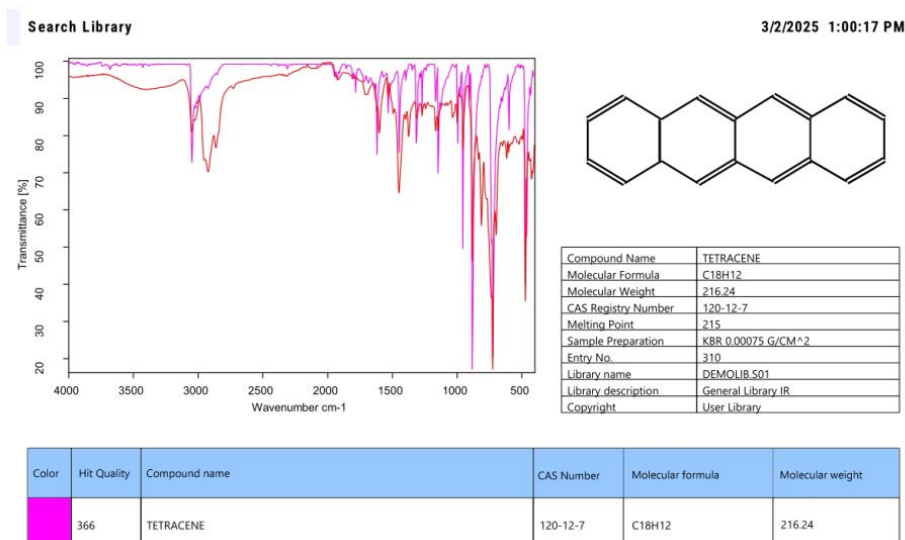


Рис. 10. ИК-спектр выделенного тетрацена

Fig. 10. IR spectrum of the isolated tetracene

Полученная тетраценсодержащая фракция выступает в качестве ключевого сырья для направленного синтеза амфолитных сорбентов, предназначенных для ультратонкой очистки технологической воды. Разработанный способ получения аминокарбоксильного амфолита на основе продуктов переработки тар-сырья защищен патентной заявкой [4], что подтверждает новизну и практическую значимость предложенного технологического решения.

Экологическая и экономическая целесообразность разработанного процесса подтверждается оригинальными экспериментальными данными: выход целевой тетраценовой фракции достигает 7,2 мас. % при суммарных потерях всего 1,0 %, а 59 % исходного сырья вовлекается в полезные продукты. Кубовый остаток (40,0 %) полностью конвертируется в сырье для технического углерода или битумов, что исключает захоронение и снижает экологическую нагрузку [6, 7]. Расчет материального баланса с погрешностью $\leq 0,1$ % и высокая селективность фракционирования ($\alpha = 1,2\text{--}1,5$) обеспечивают технико-экономическую эффективность и полное соответствие принципам циркулярной экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и экспериментально обоснован ресурсосберегающий способ переработки смолистых отходов пиролиза газоконденсата Устьюртского газохимического комплекса. Метод основан на последовательной вакуумной дистилляции (15–20 кПа) с последующей низкотемпературной кристаллизацией и позволяет выделить фракцию, обогащенную тетраценом и его алкильными гомологами, с суммарным выходом 7,2 мас. % от исходного сырья.

Технологическая эффективность подтверждена полным материальным балансом (погрешность $\leq 0,1$ %), минимальными потерями (1,0 %) и селективностью разделения ключевых компонентов ($\alpha = 1,2\text{--}1,5$). Суммарный выход дистиллятных фракций составляет 59,0 %; кубовый остаток (40,0 %)

пригоден для получения технического углерода или битумных материалов [6, 8], что обеспечивает практически безотходную утилизацию.

Выделенная тетраценсодержащая фракция служит сырьем для направленного синтеза амфолитных сорбентов. Разработанный способ получения аминокарбоксильного амфолита на основе продуктов переработки тар-сырья защищен патентной заявкой [4]. Такие сорбенты обладают сочетанием катионо- и анионообменных свойств и могут быть эффективно использованы для глубокой очистки промышленных сточных вод от разнородных ионных примесей, включая катионы тяжелых металлов и анионы минеральных кислот.

Таким образом, предложенная технология позволяет трансформировать экологически опасные отходы в востребованные продукты водоочистки, снижая антропогенную нагрузку и способствуя внедрению принципов циркулярной экономики в нефтегазохимическом секторе Узбекистана. Для практической реализации рекомендуется масштабирование процесса синтеза сорбентов и оценка их эффективности в системах промышленной водоподготовки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Официальный сайт СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical». <http://www.uz-kor.com> (дата обращения: 01.12.2025).
2. Ахмадалиев М. А., Шарофиддинов И. И. (2021). Изучение образования тяжелых смолистых тар-продуктов при пиролизе углеводородного сырья Устюртского газоконденсата. *Universum: Технические науки*, 5(86), 20–24. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.86.5.11722>.
3. Исакулова М. Ш. (2022). Химический состав и применение тар-продукта, образующегося при пиролизе углеводородов. *Экономика и социум*, 9(100), 367–370.
4. Заявка на патент IAP 20250666 (дата подачи – 03.10.2025). Способ получения аминокарбоксильного амфолита на основе тар-продукта.
5. Драбкова Т. В., Турабджанов С. М. (2025). Разработка ионообменной установки для энергоэффективной очистки сточных вод. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*, 8(437), 167–188. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.08.167-188>.
6. Косарева М. А., Стахеев С. Г., Третьякова Н. А. (2022). Основные технологии переработки нефтегазового сырья. *Учебное пособие. Издательство Уральского университета, Екатеринбург*.
7. Кенжаев А. К., Нурмонов С. Э., Кодиров О. Ш. (2021). Определение состава продукта пиролиза «пиролизное масло». *Композиционные материалы*. (2), 15–17.
8. Кенжаев А. К., Нурмонов С. Э., Кодиров О. Ш. (2022). Синтез сульфокатионитов на основе вторичных продуктов. *Развитие науки и технологий*. (5), 100–110.

9. Кенжаев А. К., Нурмонов С. Э., Хакбердиев Ш. М. (2022). Синтез и свойства полиметиленафталинсульфокислоты на основе вторичного продукта пиролиза углеводородов. *Universum: химия и биология*, (7-2(97)), 31–36.
10. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. (2006). Определение строения органических соединений. *Мир, Москва*.
11. Кодиров О.Ш., Мирзакулов Х.Ч., Бердиев Х.У., Шарипова В.В. (2018). Исследование химического состава пироконденсата пиролизного производства. *Universum: Технические науки*, 9(54), 59–64. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6383>.
12. Drabkova T. V., Gusev A. L., & Turabdzhanov S. M. (2026). Energy-self-sufficient ion-exchange system for pre-electrolysis water treatment in green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153860>.
13. Reid, R. C., & Prausnitz, J. M. (1987). Poling, The properties of gases and liquids. *McGrawHill Book Company, 4th Ed.; New York*.
14. Сивухин Д. В. (1990). Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. *Наука, Москва*.

References:

1. Official website of Uz-Kor Gas Chemical JV LLC. <http://www.uz-kor.com> (accessed: 01.12.2025) (in Russ.).
2. Ahmadaliev M. A., & Sharofiddinov I. I. (2021). Study of the formation of heavy tarry products during pyrolysis of Ustyurt gas condensate hydrocarbon feedstock. *Universum: Technical Sciences*, 5(86), 20–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.86.5.11722>.
3. Isakulova M. Sh. (2022). Chemical composition and application of tar product formed during pyrolysis of hydrocarbons. *Economy and Society*, 9(100), 367–370 (in Russ.).
4. Pat. 20250666 IAP. Method for producing aminocarboxylic ampholyte based on tar product. Appl. 03.10.2025 (in Russ.).
5. Drabkova T. V., & Turabdzhanov S. M. (2025). Development of an ion-exchange unit for energy-efficient wastewater treatment. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 8(437), 167–188 (in Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.08.167-188>.
6. Kosareva M. A., Stakheev S. G., & Tretyakova N. A. (2022). Basic technologies for processing oil and gas raw materials. Textbook. *Ural Federal University Publishing House, Yekaterinburg*. (in Russ.).
7. Kenjaev A. K., Nurmonov S. E., & Kodirov O. Sh. (2021). Determination of the composition of the pyrolysis product “pyrolysis oil”. *Composite Materials*, (2), 15–17 (in Uzb.).
8. Kenjaev A. K., Nurmonov S. E., & Kodirov O. Sh. (2022). Synthesis of sulfocationites on the basis of secondary products. *Development of Science and Technologies*, (5), 100–110 (in Uzb.).
9. Kenjaev A. K., Nurmonov S. E., & Khakberdiev Sh. M. (2022). Synthesis and properties of polymethylene naphthalene sulfonic acid based on a secondary hydrocarbon pyrolysis product. *Universum: Chemistry and Biology*, 7(97), (2), 31–37 (in Russ.). <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/13871>.
10. Pretsch E., Bühlmann P., & Affolter C. (2000). Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data. *Springer, (4th ed.) Berlin*.
11. Kodirov O. Sh., Mirzakulov Kh.Ch., Berdiev Kh. U., & Sharipova V. V. (2018). Study of the chemical composition of pyrolysis production pyrocarbonate. *Universum: Technical Sciences*, 9(54), 59–64 (in Russ.). <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6383>.
12. Drabkova T. V., Gusev A. L., & Turabdzhanov S. M. (2026). Energy-self-sufficient ion-exchange system for pre-electrolysis water treatment in green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153860>.
13. Reid, R. C., & Prausnitz, J. M. (1987). Poling, The properties of gases and liquids. *McGrawHill Book Company, 4th Ed.; New York*.

14. Sivukhin, D. V. (1990). General Course of Physics. Thermodynamics and Molecular Physics. *Nauka, Moscow*. (in Russ.).