ФИШЕР–ТРОПШ ПРОЦЕСС: НЕФТЕХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТОПЛИВУ БУДУЩЕГО

Цуканов М.Н.

Д.ф.т.н., доцент кафедры «Технология переработки нефти и газа», Бухарский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрен процесс Фишера–Тропша как одно из ключевых направлений развития современной нефтехимии, обеспечивающее получение синтетических жидких топлив из различных углеродсодержащих источников — природного газа, угля и биомассы. Представлены химические основы, технологические схемы и перспективы внедрения процессов GTL, CTL и BTL в контексте перехода к низкоуглеродной экономике. Особое внимание уделено экологическим и энергетическим преимуществам синтетических топлив нового поколения.

Ключевые слова: синтетическое топливо, Фишер–Тропш, синтез-газ, GTL, CTL, BTL, катализ, декарбонизация, энергоэффективность.

Annotatsiya. Maqolada zamonaviy neft-kimyo sanoatining asosiy yo‘nalishlaridan biri bo‘lgan Fisher–Tropsh jarayoni ko‘rib chiqilgan. Ushbu jarayon turli uglerodli manbalardan — tabiiy gaz, ko‘mir va biomassadan — sun’iy suyuq yoqilg‘ilar olish imkonini beradi. GTL, CTL va BTL jarayonlarining kimyoviy asoslari, texnologik sxemalari hamda past uglerodli iqtisodiyotga o‘tish sharoitidagi joriy etish istiqbollari bayon etilgan. Ayniqsa, yangi avlod sun’iy yoqilg‘ilarining ekologik va energetik ustunliklariga alohida e’tibor qaratilgan.

Kalit so‘zlar: sun’iy yoqilg‘i, Fisher–Tropsh, sintez-gaz, GTL, CTL, BTL, kataliz, dekarbonizatsiya, energiya samaradorligi.

Abstract. The article discusses the Fischer–Tropsch process as one of the key directions in the development of modern petrochemistry, enabling the production of synthetic liquid fuels from various carbon-containing sources — natural gas, coal, and biomass. The paper outlines the chemical principles, technological schemes, and prospects for implementing GTL, CTL, and BTL processes in the context of the transition to a low-carbon economy. Special attention is paid to the ecological and energy advantages of next-generation synthetic fuels.

Keywords: synthetic fuel, Fischer–Tropsch, syngas, GTL, CTL, BTL, catalysis, decarbonization, energy efficiency.

Введение

Современная энергетика сталкивается с необходимостью поиска альтернативных источников углеводородов, способных обеспечить устойчивое развитие при снижении выбросов CO_2. Важнейшим направлением в этом контексте становится синтез жидких топлив из синтез-газа (смеси CO и H_2), получаемого из природного газа, угля или биомассы.

ISSN 3030-3907

Процесс Фишера–Тропша, разработанный в 1920-е годы немецкими учёными Францем Фишером и Гансом Тропшем, сегодня служит основой технологий Gas-to-Liquids (GTL), Coal-to-Liquids (CTL) и Biomass-to-Liquids (BTL).

Процесс Фишера–Тропша представляет собой каталитическое превращение синтез-газа в жидкие углеводороды. Общая реакция описывается уравнением:

$$(2n+1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

Реакция протекает при температурах 200–350 °C и давлениях 10–40 бар, в присутствии катализаторов на основе железа (Fe) или кобальта (Co).

- Низкотемпературный режим (200–240 °C) — синтез парафинов и восков.
- Высокотемпературный (300–350 °C) — образование бензиновых фракций и олефинов.

Каталитическая активность и селективность процесса определяются структурой катализатора, дисперсностью активной фазы и добавками промоторов (K, Cu, Mn и др.).

Технологические направления: GTL, CTL и BTL

GTL (Gas-to-Liquids) — переработка природного газа. Основные стадии:

Паровая конверсия метана:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

Очистка синтез-газа от серы и CO_2;

Синтез углеводородов по Фишера–Тропша;

Гидроизомеризация и фракционирование продуктов.

CTL (Coal-to-Liquids) — технология получения топлива из угля путём его газификации. Преимущество CTL — независимость от природного газа, однако она сопровождается значительными выбросами CO_2.

BTL (Biomass-to-Liquids) — использование биомассы и отходов сельского хозяйства для газификации и последующего синтеза жидких топлив. Этот вариант признан наиболее экологичным, поскольку обеспечивает углеродно-нейтральный цикл.

Выбор катализатора определяет направление реакции и распределение продуктов.

Fe-катализаторы активны в присутствии CO_2 и водяного пара, применяются для CTL и BTL процессов.

Co-катализаторы обеспечивают высокий выход дизельных фракций в GTL-технологиях и отличаются стабильностью при низком содержании примесей.

ISSN 3030-3907

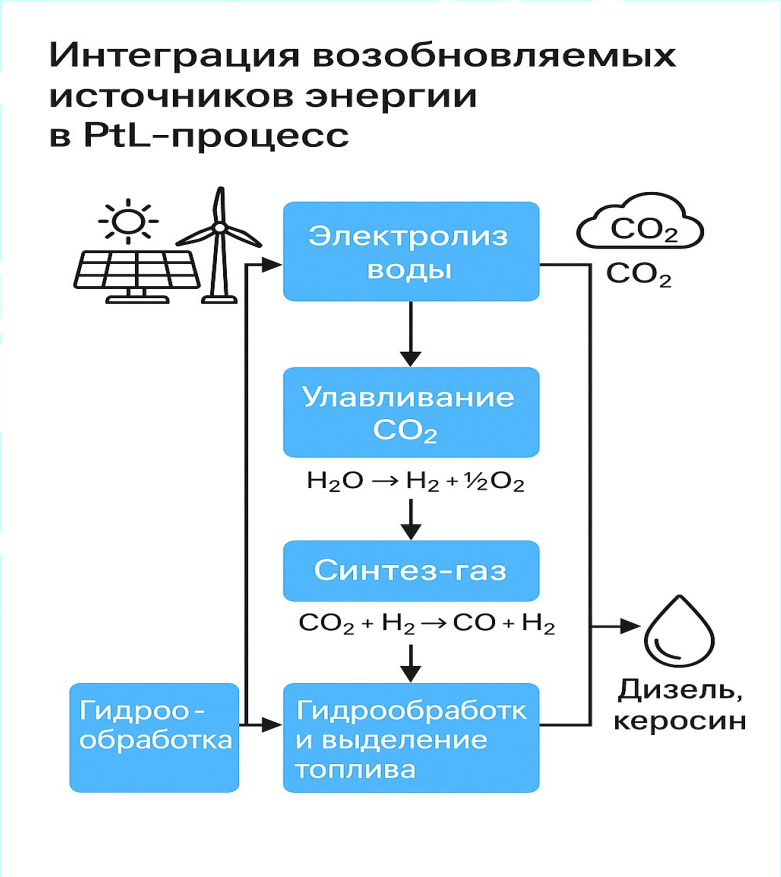
Исследования сосредоточены на разработке наноструктурированных катализаторов с увеличенной удельной поверхностью и устойчивостью к дезактивации.

Экологические и энергетические преимущества

Фишер–Тропш топливо характеризуется высокой чистотой и стабильностью свойств:

- не содержит серы и ароматических соединений;
- имеет высокое цетановое число (до 75);
- при сгорании практически не образует сажи.

Интеграция с возобновляемыми источниками энергии (**Power-to-Liquids, PtL**) позволяет производить синтетическое топливо с минимальным углеродным следом — водород получают электролизом воды с использованием солнечной или ветровой энергии.



Перспективы развития и промышленная реализация

Крупнейшие промышленные комплексы:

- **Shell Pearl GTL (Катар)** — производительность 140 тыс. баррелей в сутки;
- **Sasol (ЮАР)** — CTL-заводы в Секунде;
- **Synfuels China** — внедрение BTL-технологий на биосырье.

Перспективным направлением является **модульный GTL** для малых месторождений и интеграция с технологиями улавливания CO_2. Это позволит обеспечить выпуск «чистого топлива» даже в удалённых регионах.

ISSN 3030-3907

Гидрирование твердого топлив представляет собой деструктивный каталитический процесс, проводимый при 400–500 °С под давлением водорода 20–70 МПа. В этих условиях в органической массе топлива протекают следующие реакции:

$$(C)_n + nH_2 \rightarrow C_nH_{2n} \quad (12.7)$$

- гидрирование образовавшихся алкенов

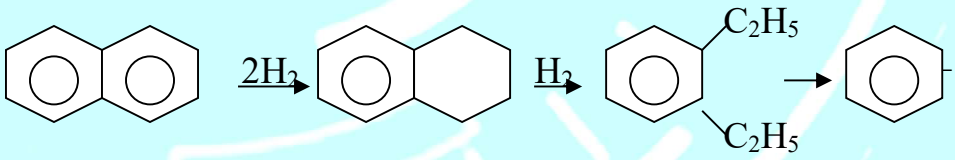
$$C_nH_{2n} + H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} \quad (12.8)$$

- деструкции высших алканов с последующим гидрированием образовавшихся алкенов и обазованием алканов с меньшей молекулярной массой

$$C_nH_{2n+2} \rightarrow C_mH_{2m+2} + C_pH_{2p} \quad (12.9)$$

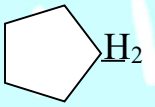
$$C_pH_{2p} + H_2 \rightarrow C_pH_{2p+2} \quad (12.10)$$

- гидрирования конденсированных углеводородных систем с последующим разрывом цикла и деалкилированием



$$2C_2H_4 \quad (12.11)$$

- раскрытия пятичленных циклов с образованием изоалканов



$$CH_3 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_3 \quad (12.12)$$
$$|$$
$$R$$

и другие реакции.

Процесс гидрирования твердого топлива является каталитическим. В качестве катализаторов используют контактные массы на основе соединений молибдена, никеля или железа, активированные, например, оксидами кальция и бария. В качестве носителя применяют оксид алюминия. Пример такой композиции имеет состав: $MoO_3 + NiS + CaO + Al_2O_3$.

Впервые гидрогенизацией угля получил жидкое топливо (бензин) в 1911 г. немецкий химик Ф. Бергиус.

Однако промышленная реализация получения моторных топлив из угля базировалась на другом способе газификации угля, а именно: его взаимодействием с водяным паром с получением синтез-газа:

$$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2 \quad (12.13)$$

Это эндотермическая реакция, которая существенно сдвинута вправо при температуре 900–1000 °С. Необходимую температуру можно получить парциальным сжиганием части угля по реакции:

$$C + 0{,}5O_2 \rightarrow CO, \quad (12.14)$$

ISSN 3030-3907

в которй также получают оксид углерода (II).

История использования синтез-газа для производства моторного топлива восходит к 1926 г., когда немецкие ученые **Ф. Фишер и Г. Тропш** опубликовали работу «О прямом синтезе нефтяных углеводородов при обыкновенном давлении», в которой сообщалось, что при восстановлении водородом монооксида углерода при атмосферном давлении в присутствии различных катализаторов (железо – оксид цинка или кобальт – оксид хрома) при 270°С получаются жидкие и даже твердые гомологи метана.

Так возник знаменитый синтез углеводородов из монооксида углерода и водорода, называемый с тех пор синтезом *Фишера-Тропша*. Смесь CO и H_2 в различных соотношениях, называемая синтез-газом, легко может быть получена как из угля, так и из любого другого углеродсодержащего сырья. Процесс Фишера – Тропша описывается следующими уравнениями

$$n\mathrm{CO} + (2n + 1)\,\mathrm{H_2} \rightarrow \mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2} + n\mathrm{H_2O}, \qquad (12.15)$$

$$2n\mathrm{CO} + (n + 1)\,\mathrm{H_2} \rightarrow \mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2} + n\mathrm{CO_2}. \qquad (12.16)$$

В направлении (12.15) синтез идет на никельсодержаих (например, Ni-Mn-Al_2O_3 на кизельгуре или сплав Ni-Si-Mn) либо кобальтовых катализаторах (например, Co-ThO_2 или Co-ThO_2-MgO на кизельгуре) при 175–215 °С, 0,1–1,5 МПа, объемном соотношении CO/H_2 1/1–1/2. Выход углеводородов в этом случае составляет 100–180 мл на 1 м^3 исходной газовой смеси. Пример фракционного состава для Co-катализатора: фракция с $T_{кип}$ <150 °С (бензин) – 20–24 %; 150 – 200 °С – 12–15 %; 250–300 °С – 25 %; парафины 34–42 %. В основном все фракции содержат алканы с нормальной цепью; При этом бензиновая фракция содержит от 8 до 40 % олефинов.

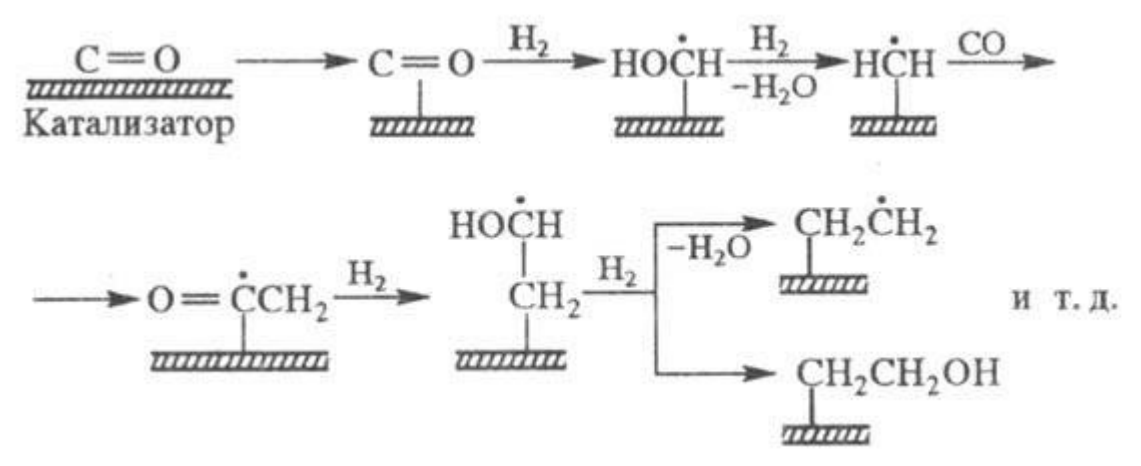
На катализаторах на основе железа (например, Fe-ZnO либо Fe-Cu-Mn на доломите или кизельгуре) при 220–250 °С, 0,5–1 МПа и объемном соотношении CO/H_2 2/1 – 1/1 преобладает процесс (12.16). Выход углеводородов до 160 мл на 1 м^3 газовой смеси (в т.ч. бензина и масел около 110 мл). В числе жидких продуктов содержатся значительные количества (до 60 %) олефинов.

Парафины преимущественно (60–70 %) образуются на рутениевых катализаторах при 180–200 °С и 10–30 МПа. На оксидах Cr, Mo, Th с добавками K_2CO_3 при 475–500 °С, 3 МПа и соотношении CO/H_2 1/1 образуются значительные количества аренов. На оксидах Zn, Al или Th при 420 – 450 °С, 30 МПа и соотношении CO/H_2 1,2/1 основные продукты – изоалканы (главным образом изобутан и изопентан).

В качестве побочных продуктов образуются в незначительных количествах карбоновые кислоты, спирты, альдегиды.

ISSN 3030-3907

Механизм Фишера – Тропша синтеза до конца не выяснен. Наиболее вероятно, что первая стадия – образование комплекса металла и CO, затем начинается синтез углеводородной цепи, например:



В росте цепи могут участвовать структурные единицы с одним, двумя и большим числом атомов C (образуются, напр., в результате деструкции углеводородов с длинной цепью).

В присутствии Ce, Cr, Mn, Mo и некоторых других металлов и их оксидов при высоких давлениях и температурах (около 15 МПа, 400–450 °C) из CO и H_2 образуются в основном кислородсодержащие соединения (около 10 % кислот, остальное – спирты, альдегиды, кетоны).

Заключение

Процесс Фишера–Тропша представляет собой фундаментальный нефтехимический метод получения синтетических углеводородов из любого углеродсодержащего сырья. Его гибкость, совместимость с возобновляемыми источниками энергии и экологическая чистота делают Фишера–Тропша одним из основных направлений в переходе к топливу будущего — чистому, устойчивому и стратегически независимому.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dry M. E. The Fischer–Tropsch process: 1950–2000. *Catalysis Today*, 2002, 71(3–4), pp. 227–241.

2. Anderson R. B. *The Fischer–Tropsch Synthesis*. Academic Press, 1984.

3. Maitlis P. M., de Klerk A. *Greener Fischer–Tropsch Processes for Fuels and Feedstocks*. Wiley-VCH, 2013.

4. Киселёв В.Ф. Каталитические процессы переработки синтез-газа. – М.: Химия, 2010.

5. Широков С.С. и др. Современные направления в технологии синтетических топлив. – *Нефтехимия*, 2020, №4, с. 32–40.

ISSN 3030-3907