СИНТЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Цуканов М.Н.

д.ф.т.н., доцент кафедры «Технология переработки нефти и газа»

Бухарский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрено современное состояние, основные технологии и перспективы развития производства синтетического топлива. Показано, что синтетическое топливо на основе синтез-газа (смеси оксида углерода и водорода) играет важную роль в обеспечении энергетической независимости, экологической устойчивости и рационального использования углеродных ресурсов. Особое внимание уделено технологиям GTL (Gas-to-Liquid), CTL (Coal-to-Liquid) и BTL (Biomass-to-Liquid), процессам Фишера–Тропша, а также интеграции возобновляемых источников энергии в производственные циклы. Проанализированы тенденции декарбонизации, цифровизации и повышения энергоэффективности химических процессов.

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

Annotatsiya. Maqolada sun’iy yoqilg‘i ishlab chiqarishning hozirgi holati, asosiy texnologiyalari va rivojlanish istiqbollari ko‘rib chiqilgan. Ko‘rsatilishicha, sintez-gaz (uglerod oksidi va vodorod aralashmasi) asosidagi sun’iy yoqilg‘i energiya mustaqilligini ta’minlashda, ekologik barqarorlikni oshirishda hamda uglerod resurslaridan oqilona foydalanishda muhim rol o‘ynaydi. Ayniqsa, GTL (Gas-to-Liquid), CTL (Coal-to-Liquid) va BTL (Biomass-to-Liquid) texnologiyalariga, Fisher–Tropsh jarayonlariga hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini ishlab chiqarish sikllariga integratsiya qilish masalalariga alohida e’tibor qaratilgan. Shuningdek, dekarbonizatsiya, raqamlashtirish va kimyoviy jarayonlarning energiya samaradorligini oshirish tendensiyalari tahlil qilingan.

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

Abstract. The article discusses the current state, main technologies, and future prospects for synthetic fuel production. It highlights that synthetic fuels based on synthesis gas (a mixture of carbon monoxide and hydrogen) play a key role in ensuring energy independence, environmental sustainability, and efficient use of carbon resources. Particular attention is given to GTL (Gas-to-Liquid), CTL (Coal-to-Liquid), and BTL (Biomass-to-Liquid) technologies, Fischer–Tropsch processes, and the integration of renewable energy sources into production cycles. Trends in decarbonization, digitalization, and energy efficiency improvement are analyzed.

ISSN 3030-3907

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

Введение

Синтетическое топливо (СТ) представляет собой продукт глубокой химической переработки углеводородного, угольного, биомассового или другого углеродсодержащего сырья. Интерес к этому направлению резко возрос в последние десятилетия на фоне колебаний цен на нефть, необходимости снижения углеродных выбросов и перехода к «зеленой» энергетике.

С точки зрения энергетической безопасности, синтетическое топливо позволяет использовать локальные источники углерода — природный газ, уголь, биомассу, отходы и даже CO_2. Технологии GTL, CTL и BTL активно развиваются как в промышленно развитых странах, так и в государствах с высоким потенциалом углеродных ресурсов.

На сегодняшний день ведущими производителями синтетического топлива являются Южно-Африканская Республика (Sasol), Катар (Oryx GTL, Pearl GTL), Малайзия (Petronas GTL), Китай (Shenhua CTL) и Германия (Shell Middle Distillate Synthesis).

Основная продукция — синтетический дизель, керосин, бензин, а также химические полуфабрикаты (олефины, спирты, парафины).

Современные установки достигают производительности более 30–40 тыс. баррелей в сутки, демонстрируя высокую стабильность процессов и экологическую чистоту по сравнению с традиционной нефтепереработкой.

Процесс Фишера–Тропша является основным этапом синтеза жидких углеводородов из синтез-газа — смеси оксида углерода (CO) и водорода (H_2).

Реакция протекает при:

- Температуре: 200–350 °C
- Давлении: 10–40 бар
- Катализаторы: железо (Fe) или кобальт (Co)

Общая реакция:

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

Продукты зависят от состава синтез-газа, температуры и катализатора — от метана до длинноцепочечных восков, которые впоследствии гидрокрекингуются в дизельное или авиационное топливо.

ISSN 3030-3907



Рис. 1 – Схема процесса Фишера–Тропша (GTL-цепочка)

Технологии GTL, CTL и BTL

- **GTL (Gas-to-Liquid)** — конверсия природного газа через синтез-газ в жидкие углеводороды.
- **CTL (Coal-to-Liquid)** — переработка угля посредством газификации и последующего синтеза Ф–Т.
- **BTL (Biomass-to-Liquid)** — аналогичный процесс, использующий биомассу (щепу, сельхозотходы, органику).

BTL рассматривается как наиболее перспективное направление, поскольку использует возобновляемое сырьё и способствует снижению выбросов CO_2.

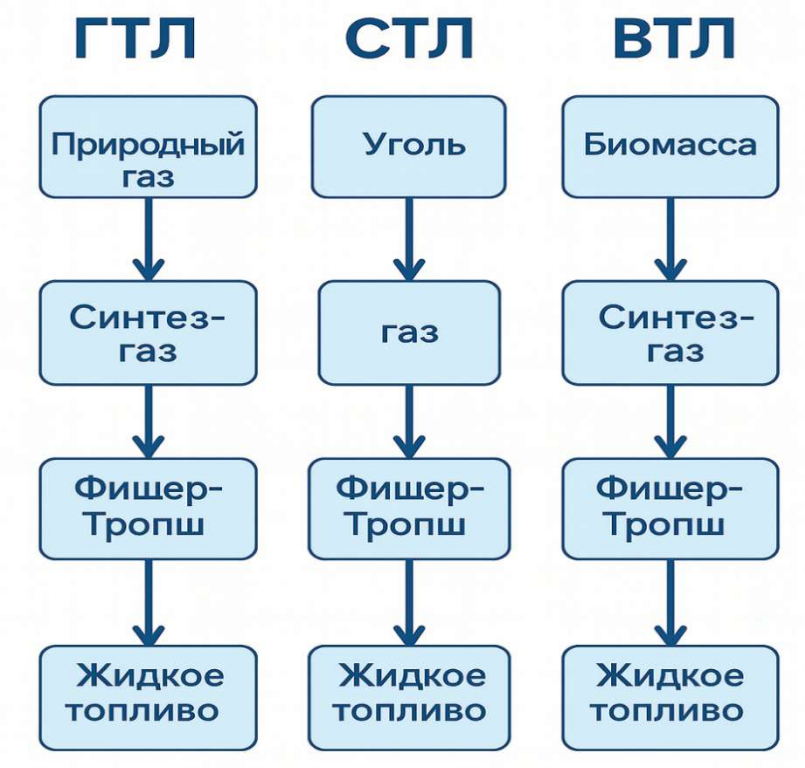


Рис. 2 – Сравнительная схема процессов GTL, CTL и BTL

Синтез метанола и олефинов

ISSN 3030-3907

Метанол (CH_3OH) играет важную роль как сырьё для производства синтетических топлив (MTG, MTO, DME) и как универсальный химический реагент в промышленности.

Процесс:

$$2CH_3OH + O_2 \rightarrow 2CH_2O + 2H_2O$$

Дальнейшая переработка по технологии **MTO (Methanol-to-Olefins)** или **MTP (Methanol-to-Propylene)** позволяет получать ценные олефины (этилен, пропилен), используемые в нефтехимии и производстве пластиков.

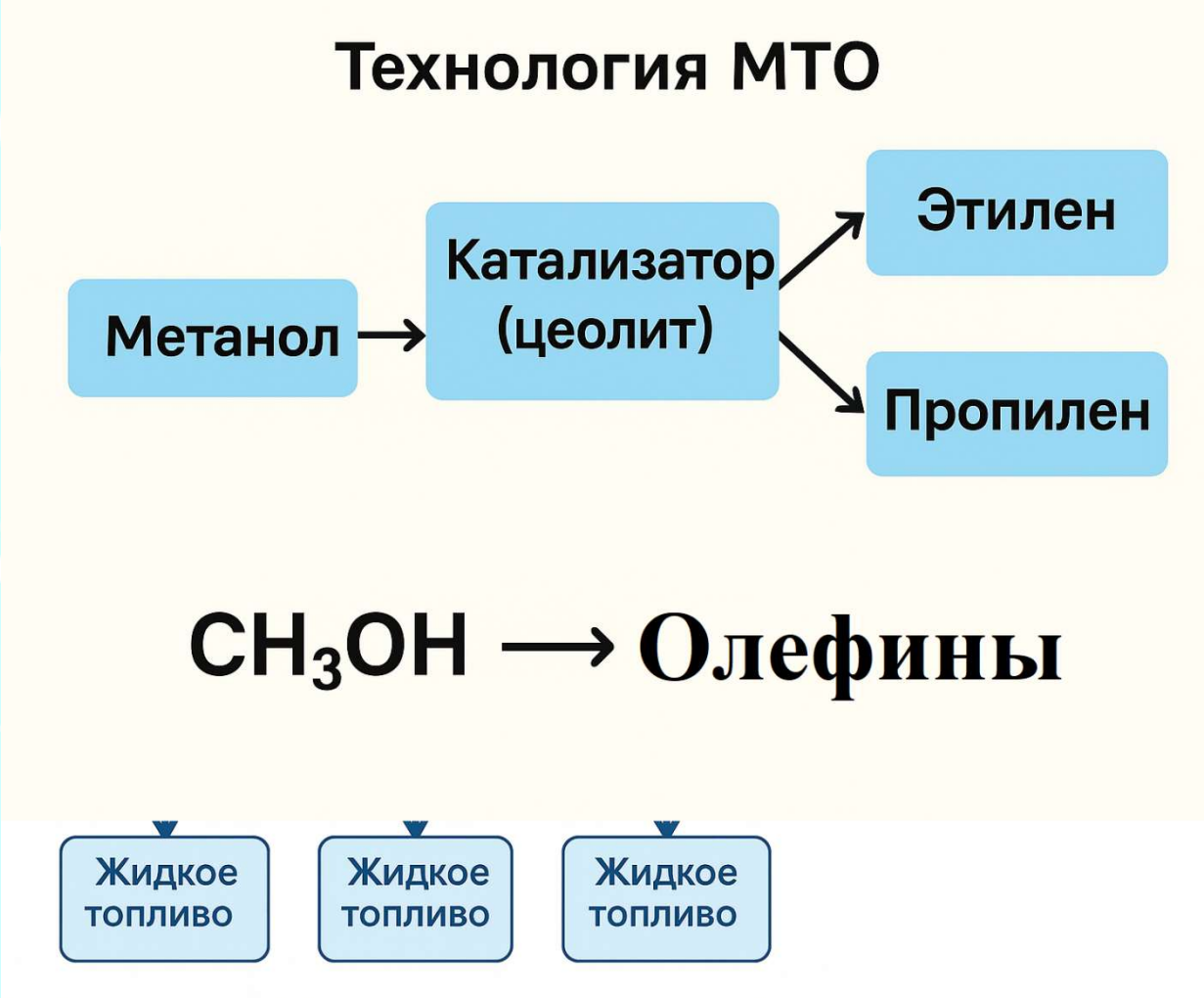


Рис. 3 – Схема технологии MTO (метанол → олефины)

Современная концепция устойчивого развития требует сокращения углеродного следа и повышения энергоэффективности. Основные перспективные направления:

- Использование **зелёного водорода** (H_2, полученного электролизом на ВИЭ);
- Переработка **CO_2** в синтез-газ (через реакции $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$);
- Интеграция **цифровых систем управления** (Digital Twin, AI-моделирование) для оптимизации реакторов;

ISSN 3030-3907

- Разработка новых **катализаторов на основе наноструктур** и переходных металлов;
- Совмещение процессов GTL и Power-to-Liquid (PtL) для улавливания и переработки углерода из атмосферы.



Рис. 4 – Схема интеграции возобновляемых источников энергии в процесс GTL/PTL

В чем же заключается интерес многих стран и крупнейших нефтегазовых компаний мира к производству СЖТ из природного газа и к технологиям их производства, которые по международной терминологии называются технологиями GTL (gas-to-liquids, газ в жидкость).

Во-первых, развитие технологий GTL связано с освоением труднодоступных месторождений газа. В составе запасов природного газа в мире имеется большое число достаточно крупных и даже гигантских месторождений, расположенных в отдаленных и труднодоступных районах, вследствие чего традиционный способ «подключения» таких месторождений к газовым рынкам посредством традиционных магистральных газопроводов либо технически, либо экономически нецелесообразен. Вовлечение подобных месторождений в систему региональных газовых рынков

ISSN 3030-3907

возможно при помощи технологий переработки природного газа в СЖТ (технологий GTL).

Во-вторых, технологии GTL могут использоваться при эксплуатации относительно небольших, забалансовых месторождений, находящихся в отдаленных, но промышленно развивающихся районах, куда приходится завозить дорогие дальнепривозные нефтепродукты и моторные топлива. Исследования показали, что приемлемые (сопоставимые с нефтепереработкой) издержки производства моторных топлив по технологии GTL могут быть достигнуты на крупномасштабных установках. Однако если учесть затраты на доставку нефтепродуктов в отдаленные районы, где имеются газовые месторождения, возможно и на малогабаритных установках достигнуть более благоприятных показателей издержек на производство синтетических топлив, чем на дальнепривозные нефтяные моторные топлива.

В-третьих, в последнее время резко возросли требования к экологическим характеристикам моторных топлив и нефтепродуктов. Для удовлетворения ужесточающихся экологических требований нефтяникам во всем мире приходится расходовать миллиарды долларов. Технология GTL позволяет получать моторные топлива, отвечающие самым жестким экологическим требованиям (практически не содержат серы, имеют незначительное содержание ароматики). Использование продуктов, полученных при реализации технологий GTL, позволяет в большинстве случаев избежать необходимости значительных дополнительных инвестиций по сравнению с другими альтернативными топливами, так как может быть использована действующая инфраструктура потребления моторных топлив (танкеры, терминалы, хранилища, АЗС), не потребуется переделка транспортных средств. Получаемый по технологии GTL диметиловый эфир является отличным дизельным топливом, имеющим высокое цетановое число и не содержащим серы. При его применении потребуется некоторая переделка транспортных средств и систем заправки их топливом, однако можно использовать уже имеющиеся транспортные средства и системы их заправки, созданные для пропан-бутанового топлива. Продукты, полученные в технологических процессах GTL и используемые в качестве транспортного топлива, позволяют существенно снизить содержание вредных веществ в выхлопных газах. Результаты испытаний показали, что применение продуктов GTL вместо традиционного дизельного топлива при эксплуатации автобусного парка уменьшает выбросы оксида азота на 8%, твердых частиц на 31%, монооксида углерода на 49%, углеводородов на 35%. Учитывая все ужесточающиеся требования к охране окружающей среды от выбросов

ISSN 3030-3907

транспортных средств, возможность производства экологически чистых моторных топлив путем использования технологии GTL является альтернативой дорогостоящим процессам повышения качества нефтяных моторных топлив и может явиться дополнением при компаундировании нефтяных топлив с целью повышения их экологической безопасности.

В-четвертых, технологии GTL предоставляют возможность утилизации попутного нефтяного газа с целью получения из него моторных топлив и химических продуктов, уменьшая тем самым объемы сжигания попутного газа на промыслах.

Некоторыми экспертами технологии GTL рассматривается в качестве альтернативы при разработке и реализации проектов по производству и транспортировке сжиженного природного газа. По мнению автора, предпочтительнее говорить об одновременном осуществлении проектов по производству сжиженного природного газа и реализации технологий GTL, которые будут взаимодополнять друг друга. Точно также технологии GTL могут сочетаться с разработкой газоконденсатных месторождений. При этом может быть реализовано производство СЖТ и налажен выпуск продуктов из газового конденсата.

История технологий получения СЖТ началась с открытия в 1923 г. немецкими химиками Францем Фишером и Хансом Тропшом процесса каталитического превращения синтез-газа (смеси оксида углерода и водорода) в жидкие углеводороды. На базе технологий получения синтез-газа и процесса Фишера-Тропша в Германии в 30-е годы были построены заводы по производству СЖТ из угля. В послевоенный период производство СЖТ из угля было освоено в ЮАР компанией Sasol. К настоящему времени мощности установок компании Sasol по производству СЖТ из угля составляют несколько миллионов тонн.

В 1985 г. введен в эксплуатацию первый промышленный агрегат по производству СЖТ из природного газа (технология GTL) компании Mobil в Новой Зеландии. Процесс осуществлялся в 2 стадии: синтез метанола и получение из метанола СЖТ. Однако из-за высоких издержек производства синтетических топлив была законсервирована вторая стадия процесса и компания Methanex, купившая у Mobil эту установку, производит на ней только метанол.

Основными продуктами, получаемыми по технологии GTL, являются сжиженные газы, нафта (фракции прямогонного бензина), дизельное топливо, специальные продукты (высокомолекулярные парафины). Среди продуктов переработки природного газа в СЖТ можно также назвать диметиловый эфир (ДМЭ) и ряд химических продуктов на его основе, не

ISSN 3030-3907

говоря уже о получаемых в больших объемах на действующих предприятиях метаноле, формальдегиде.

Нафта (легкие бензиновые фракции), получаемая по технологии GTL, имеет благоприятный фракционный состав, не содержит ароматических углеводородов и серы. Указанные свойства позволяют использовать такую нафту как высококачественное нефтехимическое сырье при производстве этилена и пропилена.

Дизельное топливо, получаемое по технологии GTL, имеет высокое цетановое число (60-70 по сравнению с 40-50 у дизельного топлива, получаемого на нефтеперерабатывающих заводах). Кроме этого дизельное топливо практически не содержит серы и имеет очень низкое содержание ароматических углеводородов. Учитывая тот факт, что нефтепереработчикам для удовлетворения все ужесточающихся требований к охране окружающей среды, в частности, с целью удаления серы из дизельного топлива, приходится тратить миллионы долларов, дизельное топливо по технологии GTL можно использовать для компаундирования с обычным нефтезаводским дизельным топливом, снижая затраты и обеспечивая повышенные экологические характеристики топлива.

Заключение

Синтетическое топливо представляет собой стратегически важное направление развития мировой энергетики. Оно позволяет эффективно использовать разнообразные источники углерода, снижать зависимость от нефти и минимизировать воздействие на окружающую среду. Внедрение цифровых технологий, новых катализаторов и интеграция ВИЭ открывают широкие перспективы для устойчивого производства синтетических топлив и химических продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson R. B. *The Fischer–Tropsch Synthesis*. – Academic Press, 1984.
2. Dry M. E. *Fischer–Tropsch processes and catalysts*. – Catalysis Today, 2002.
3. Speight J. G. *Gas to Liquids (GTL) Technology: Overview and Challenges*. – CRC Press, 2019.
4. Киселёв В. П. *Технология синтетического топлива*. – М.: Химия, 2010.
5. Лабутин Н. В. *Газохимические технологии синтеза жидких углеводородов*. – СПб.: Недра, 2017.
6. Shell Global Solutions. *GTL Process Overview*. – Technical Report, 2022.
7. Sasol Ltd. *CTL and BTL Technology Review*. – Johannesburg, 2021.
8. Петров А. В. *Энергетика и декарбонизация промышленности*. – Журнал «Химическая технология», № 4, 2023.

ISSN 3030-3907