

10. *Arens V.J., Pankov A.V. et al.* Chink hydro extraction of ore experience at the Shamraev district of KMA // Mining magazine. — 1995. — № 1. — P. 23–26.
11. *Zhurin S.N., Strelcov V.I., Kolesnikov V.I.* Surrounding components monitoring during chink hydro extraction // Mining Magazine. — 2000. — № 11–12. — P. 86–89.
12. *Karenov R.S.* Coal and ore mining chink technology perspectives // Modern problems of bowels complex mastering and ways of solving these problems: International scientific-practical conference materials / Almaty DGP «IGD named after D.A.Kunaev», 26<sup>th</sup> January 2007. — Almaty: Work of institute of mining named after D.A.Kunaev «Ensuring scientific-technical providing of mining industry». — 2007. — Vol. 73. — P. 157–166.
13. *Liber U.V., Kroitor R.V.* Working exploitation of cyrcon-titan sands of Thorium deposit // Mining Magazine. — 1996. — № 4. — P. 12–17.
14. *Babichev N.I.* Chink hydro technology — new way of mastering bowels // Mining magazine. — 1995. — № 1. — P. 14–18.
15. *Arens V.J., Chchean G.H.* Chink hydro extraction of coal // Coal. — 1996. — № 3. — P. 16–18.
16. *Arens V.J., Chchean G.H.* Chink hydro extraction of coal // Coal. — 1996. — № 5. — P. 18–22.
17. *Ananin A.I., Bortsov A.I. et al.* Perspectives of using the methods of chink hydro extracting at East Kazakhstan // Kazakhstan mining magazine. — 2004. — № 1. — P. 6–8.
18. *Altaev S.A., Tumakov V.A. et al.* Chink hydraulic technology of mining bithuminostic rocks in Kazakhstan // Complex using of mineral raw material. — 1992. — № 11. — P. 75–77.
19. *Micheev O.V., Melnik V.V.* Working out complexes of chink hydraulic coal seam work // Coal. — 1999. — № 10. — P. 54–56.
20. *Tigunov L.P., Babichev N.I.* Expanding using field of chink hydro extracting // Mining magazine. — 1995. — № 1. — P. 27–29.

УДК 622.74

## Состояние и развитие научно-исследовательских работ по проблеме переработки угля в синтетическое жидкое топливо

### A condition and development of research works on a problem of processing of coal in synthetic liquid fuel

Каренов Р.С.

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: karenov\_r@inbox.ru)*

Көмірден синтетикалық сұйық отын алу идеясының пайда болуы және оның жүзеге асуы ашылып көрсетілген. Қоңыр және тас көмірлерден сұйық отын өндіру техникасы мен технологиясының қазіргі кездегі жай-күйі қарастырылған. Көмірден синтетикалық сұйық отын алудың жаңа технологиялары мен үдерістерінің өзіндік ерекшеліктері қарастырылған. Шет елдерде көмірден синтетикалық сұйық отын алу өндірісінің дамуы және оның тиімділігі талданған. Көмірді жерасты газдандыруда бөлінетін газдардан аммиак, метанол және сұйық отын өндіру технологиясының принципті сызбасы келтірілген. Қазақстанның жекелеген кен орындарындағы көмірлерді терең химиялық өңдеу деңгейінің сипатына көңіл бөлінген. Табиғи газ бен көмірді тиімділігі жоғары және экологиялық таза синтетикалық мотор отындарының құнды түрлеріне ұқсату тиімділігіне баға берілген.

Origin and implementation of the idea of reception of synthetic liquid fuel from coal is revealed. The current state of technics and the production technology of liquid fuel from brown and black coals are revealed. Prominent features of new technologies and processes of reception synthetic liquid from coal are considered. Efficiency of development of synthetic liquid fuel manufacture on the basis of extracting coals abroad is analyzed. The circuit diagram of manufacture of ammonia, methanol and liquid fuel from gas of underground gasification of coal is suggested. Attention is paid to the condition of development of deep chemical processing of coals of separate Kazakhstani coalfields. The efficiency estimation of processing natural gas and coal into valuable kinds of highly effective and non-polluting synthetic motor fuel is given.

#### *Современное состояние техники и технологии производства синтетического жидкого топлива*

Производство синтетического жидкого топлива из твердых горючих ископаемых, в частности из бурых и каменных углей, имеет относительно длинную историю. Первые опыты по решению этой проблемы на основе метода гидрогенизации были проведены в Германии Ф.Бергиусом.

Поскольку нефть и уголь близки по химическому составу, Ф.Бергиус полагал, что не должно быть принципиальной разницы в поведении полимерных веществ, из которых состоит уголь, и тяжелых углеводородов, составляющих нефть, при гидрогенизации под высоким давлением и повышенных температурах.

Поэтому исследователь и воспользовался тем же методом гидрогенизации без катализаторов в опытах по ожигению угля, сначала полученного им искусственно, а затем природного каменного и бурого.

При сравнительном изучении поведения разных углей в процессе гидрогенизации под высоким давлением ученый сделал одно очень важное наблюдение. Оказалось, что золообразующие компоненты ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др.) не оказывают заметного отрицательного влияния на превращение угля и низкосортные, малоценные угли для обычного применения вполне пригодны для ожигения.

Разработанный Ф.Бергиусом на основе глубоких и обстоятельных исследований, новый способ ожигения угля открывал возможность получения искусственного жидкого топлива из самых дешевых его сортов, и прежде всего из бурого угля.

В августе 1913 г. Ф.Бергиусу был выдан в Германии (а годом позже и во Франции) патент на его открытие.

Автор утверждал, что при нагревании угля в течение 12–15 ч при температуре около  $400^\circ\text{C}$  и давлении водорода 20 МПа можно получить 85 % летучих веществ и растворимых продуктов. При этом расход водорода составляет примерно 10 % [1].

В 1922 г. городе Рейнау вблизи Мангейма была пущена первая полупромышленная установка, на которой жидкое топливо из угля получали непрерывным методом. Прошло еще пять лет и неподалеку от крупных залежей бурого угля в городе Мерзебурге известной немецкой фирмой «Фарбениндустри» (с которой Бергиус заключил контракт на десять лет) был построен крупный завод для получения искусственного жидкого топлива из угля производительностью 100 тыс. т в год. В 1935 г. английская компания «Стандарт Ойл» построила большой завод по переработке угля и угольной смолы, который вырабатывал 100 тыс. т бензина в год.

В дальнейшем на заводах непрерывно шло совершенствование гидрогенизации углей и смолы. Были разработаны эффективные способы защиты аппаратуры от коррозии и повышения ее надежности в условиях работы при высоких температурах и давлениях. И, что особенно важно, для получения дешевого моторного топлива были найдены и освоены методы использования всех побочных продуктов и отходов, а также выделяющегося тепла.

В 1940 г. в разных странах (Великобритания, Япония и др.) уже работали двадцать заводов, на которых жидкое топливо получали из угля путем его гидрогенизации.

Наибольшего подъема промышленность искусственного жидкого топлива достигла в 1940–1943 гг., когда годовой объем его производства во всем мире оценивался 7–8 млн. т, что составляло около 2 % нефтедобычи тех лет. В тот период в мире было около 48 крупных заводов искусственного жидкого топлива.

Больше всего заводов (примерно половина), на которых вырабатывалось тогда около двух третей общего объема мирового производства жидкого топлива, находилось в Германии. Продукция германских заводов покрывала почти 75 % потребности страны в жидком топливе и 100 % — в авиационном бензине [1].

Широкие исследования по получению синтетического жидкого топлива из угля проводились в довоенные годы и в бывшем Советском Союзе. Были построены опытные установки в Харькове, Кемерово и Челябинске. Во время Великой Отечественной войны и в послевоенный период были введены в эксплуатацию три завода полукоксования угля в Черемхове, Ленинск-Кузнецком и Ангарске, на которых вырабатывалось жидкое топливо путем гидрогенизации смолы, получаемой, в свою очередь, на основе полукоксования черемховских и кузнецких каменных углей.

В начале 50-х годов в Новочеркасске был построен цех по производству жидкого топлива на основе газификации твердых горючих ископаемых с последующим превращением газа в жидкие продукты по методу Фишера–Тропша. Суточная производительность цеха по газу составляла 80 тыс.  $\text{м}^3$ , а по суммарным углеводородам — 200 т [2].

Строительство и эксплуатация заводов указанного выше профиля во всех странах сохранялись до 50-х годов прошлого столетия, т.е. до открытия и освоения крупных высокоэкономичных месторождений нефти в СССР, на Ближнем Востоке, в Северной Африке и других регионах мира. В последующие годы по этой причине и причинам экономического характера многие заводы по произ-

водству синтетического жидкого топлива из углей были переориентированы на выработку другой продукции.

Дешевизна нефти, умело поддерживаемая политическими и экономическими маневрами транснациональных монополий, определила в 50–60-х годах однобокость топливно-энергетических балансов европейских капиталистических стран: они ограничивались неглубокой переработкой импортируемой нефти, мазут постепенно вытеснял уголь, добыча которого неуклонно падала. Доля угля в производстве энергии во многих развитых странах мира снизилась до 20–25 %. Поэтому проблема производства жидкого топлива из угля была отодвинута на задний план. Однако уже в начале 60-х годов стало ясно, что беспрецедентный рост потребления нефти как основного источника энергоресурсов не может продолжаться бесконечно. Кроме того, в 70-х годах стоимость нефти на мировом рынке резко возросла. Большинство стран-потребителей нефти вступили в полосу энергетического кризиса, и вновь внимание привлек уголь как источник энергии, сырьё для получения жидкого топлива, газа и химикатов.

В 70–80-е годы XX века проблема производства жидкого топлива и газа из угля и горючих сланцев стала интенсивно разрабатываться в ряде стран мира, главным образом в США, где ресурсы нефти ограничены, а запасы дешевых углей и сланцев значительны. Исследования стали проводиться в Великобритании, ФРГ, Японии, Индии и КНР.

Например, в Великобритании работы по ожижению угля в эти годы были сосредоточены в Научно-исследовательском институте угля Национального управления угольной промышленности и направлены на создание технологических процессов и оборудования для производства жидкого топлива и химического сырья. Были разработаны двухстадийные процессы, предусматривающие первоначальную мягкую термодеструкцию компонентов угля в присутствии растворителя с последующим удалением нерастворившегося остатка и минеральных веществ и каталитический гидрокрекинг извлеченного вещества. Применение двух стадий обеспечило гибкость при выборе исходного сырья и получение разнообразных продуктов, а также позволило более эффективно использовать водород. В середине 1981 г. была подготовлена техническая документация на сооружение опытной установки производительностью около 25 т угля в сутки. Кроме того, была изучена возможность объединения процессов извлечения жидких продуктов и гидрокрекинга. Было проведено несколько экспериментальных прогонов установки, охватывающих до 20 последовательных циклов. Каждый цикл включал увеличение жидкого продукта и гидрокрекинг с регенерацией растворителя, используемого для повторной циркуляции до этапа извлечения жидкого продукта. Работа установки в течение 1000 ч была достаточно стабильной, а качество катализатора оставалось удовлетворительным и после 2 000 ч работы [3].

Начиная с 70–80-х годов прошлого столетия проблемы переработки твердых горючих ископаемых в жидкое топливо стали активно обсуждаться на мировых нефтяных и энергетических конгрессах. Были созданы проекты национальных программ, где углю в энергетическом балансе стала отводиться ведущая роль (в США проект «Независимость»; в ФРГ проект «Угольная нефть» и др.) [4].

Как следствие, в последние 15–20 лет в связи с постепенным сокращением запасов нефти и увеличением ее стоимости во многих странах мира стали интенсивно проводиться научно-исследовательские, проектно-конструкторские и опытные работы, направленные на создание инновационной технологии производства синтетических топлив из угля, имея в виду организацию в перспективе производства из него бензина, дизельного и реактивного топлива, чистого газа для электростанций, синтез-газа и водорода для химической промышленности (получение метанола, аммиака и др. продуктов). Поскольку запасов угля намного больше, чем нефти, а в ряде стран они могут разрабатываться открытым способом при сравнительно невысоких затратах, уголь в перспективе станет дополнительным источником получения сырья и материалов, вырабатываемых в настоящее время преимущественно из нефти и природного газа.

#### *Характерные особенности новых технологий и процессов получения синтетических жидких топлив из угля*

Для создания высокопроизводительной экономически эффективной технологии производства синтетического топлива из угля необходимо разработать новые процессы, так как существующие не могут быть использованы в перспективе для широкомасштабного производства.

За рубежом для повышения степени превращения органической массы угля (ОМУ), увеличения выхода жидких продуктов при умеренном расходе водорода, снижения энергозатрат, повышения

производительности оборудования, а также для решения экологических задач создаются процессы третьего поколения. Характерными особенностями новых процессов являются: повышение производительности путем увеличения концентрации угля; уменьшение времени пребывания в реакционной зоне; смягчение условий процесса на стадии ожижения (снижение давления, температуры); снижение расхода водорода, добываемого путем подбора активных катализаторов; использование отходящих гидрированных парогазовых потоков на стадии пастопритовления; создание термодинамических условий в аппаратах, исключающих проскок водорода; применение смеси  $H_2+CO$  в случае гидрирования влажных углей. При этом основной проблемой является утилизация тепла, что достигается за счет прямого нагрева пасты, рециркуляции горячих тяжелых остатков.

В конце XX века и начале XXI столетия в США, ФРГ, Канаде и других странах подготовлены к внедрению несколько проектов гидрогенизации угля. Это процессы SRS-I, SRC-II, EDS, H-Coal, New-JG-Farbeu. Одновременно в Японии, Австралии, Канаде, ЮАР разрабатываются новые технологические решения по ожижению угля (процессы NEDOL, BCL). Кроме того, в ФРГ на установке в г. Боттропе (производительностью по углю 200 т/сут) опробованы новые варианты, в том числе совместное ожижение угля и нефтяных остатков. Научные исследования продолжаются в США, Франции, Великобритании [5].

В настоящее время в США разрабатывается ряд процессов ожижения и газификации угля, в том числе на укрупненных установках, производительностью до 50 т угля в сутки. Наиболее разработанными считаются процессы «SRC» и «COED», «H-Coal», «Consol», «Exxon». Часть их основана на ожижении (растворении) угля в жидком продукте — растворителе, полученном в самом процессе ожижения и прошедшем гидрирование под высоким давлением (200 атм) водорода, а часть — путем непосредственной гидрогенизации под давлением водорода 120–200 атм. Конечным продуктом производства является малосернистое котельное и моторное топливо.

В 80-е годы прошлого столетия в ЮАР было налажено сотрудничество с компанией «Хайдрокарбон Рисерч» (США) по переработке намибийского и части капского (ЮАР) угля в СНТ на основе процесса «Эйч-Коал» («H-Coal»). Подобно методу Бергюса процесс начинается с измельчения и очистки угля и смешивания его с тяжелой нефтью для приготовления суспензии, после чего она перекачивается в реактор, смешивается с водородом и нагревается в присутствии катализатора. Продукты реакции — сырая нефть и дистилляты. Сырая нефть впоследствии охлаждается и подвергается очистке, а затем с помощью термических процессов и риформинга перерабатывается в бензин и керосин. Часть дистиллятов также идет на переработку и превращается в мазут, дизельное топливо или сырую нефть, направляющуюся на выработку бензина. Другие дистилляты после отделения водорода используются для выделения сернистого аммония, высококалорийного газа, смол, серы, при производстве парафинов и смазочных масел. Себестоимость получения СНТ с использованием процесса «Эйч-Коал» примерно на 25 % ниже по сравнению с применяющимися в ЮАР другими методами [6].

Значительный интерес вызывает выявление особенностей новых технологий гидрогенизации угля — ITSL, Pyrosol, NEDOL.

Так, процесс ITSL — это двухстадийный интегральный процесс с небольшим временем пребывания, который разработан фирмами Lummus и Кегг-мс, Gee Corp. На первой стадии ожижения время пребывания в реакционной смеси уменьшено с 30–60 до 7–14 мин за счет применения реакторов с псевдоожиженным слоем катализатора. Расход водорода при этом не увеличился и составил 4,6–5,3 % на органическую массу угля, в том числе на первой стадии 2–3 %, т.е. такой же, как в процессе SRC-II (4,5–5 %). Выход нефти и масла также не уменьшился, а выход тяжелого остатка снизился на 10–20 %. Применение стадии скоростного ожижения потребовало более глубокой переработки шлама гидрогенизации методом экстракции «ASDA» и вторичной каталитической гидрогенизации обеззоленного экстракта методом «LS-Fiuiug». Процесс прошел испытания на опытных установках производительностью 2,5 и 6 т/сут. Разрабатывается вариант с применением  $Mo$  в качестве катализатора на первой стадии [7].

В процессе Pyrosol после стадии неглубокого гидрирования углемасляной пасты в мягких условиях (катализатор 40 %  $Fe_2O_3$ , температура 465 °С, давление 20 МПа) шлам подвергается гидропиролу. Выход масел метана при температуре 400 °С на первой стадии составляет 25 %, в последующем ходе процесса увеличивается до 50 %.

Водород получают путем газификации как кокса со стадии гидропиролуза, так и сухого угля или путем конверсии углеводородных газов. По сравнению с новой немецкой технологией «IG-Farbeu»

(давление 30 МПа, температура 480 °С) снижен расход водорода до 3–4 %, на 10 % уменьшено газообразование [5].

В Японии исследования и разработка технологии процессов ожижения угля проводятся в рамках проекта «Sunshine» [8]. Разработано три варианта ожижения битуминозного угля: прямая гидрогенизация; экстракция растворителем; сольволиз. Процессы апробированы на проточных установках производительностью по углю 0,1–2,4 т/сут. Экономическая ситуация привела к разработке новой комбинированной технологии NEDOL, объединяющей три указанных выше процесса.

Технология включает следующие стадии: каталитическую гидрогенизацию при температуре 430–460 °С под давлением 15–20 МПа; вакуумную дистилляцию шлама; гидрирование растворителя в присутствии никель-молибденового катализатора при температуре 350 °С и давлении 10–15 МПа. В процессе NEDOL получают 40 % нефти и среднего масла или 50 % транспортного топлива. Совместно с Австралией сооружена и действует установка производительностью 50 т/сут в г. Морвелл (штат Виктория). В настоящее время разработан проект установки производительностью 250 т/сут [5].

Во всех процессах ITSL, Pygosol, NEDOL характерны мягкие условия гидрирования (температура 430–460 °С, давление 10–20 МПа), многостадийность (по сравнению с процессами второго поколения SRC, H-Coal, EDS), которая оправдана глубоким превращением органической массы угля и возможностью приспособить технологический процесс к различному виду угля, в том числе к углю с высокой влажностью.

Уголь влажностью более 15 % ожижается в процессах Co-steam, новой немецкой технологии EDS, NEDOL, Pygosol. Чтобы снизить энергозатраты на сушку угля, используют прямой нагрев пасты, позволяющий смягчить условия нагрева в печи или совсем исключить ее путем использования тепла отходящих парогазовых потоков. Сущность процесса сушки пасты заключается в том, что отходящий горячий парогазовый поток, содержащий непрореагировавший водород, гидрированные легкие углеводороды, направляется на смешивание с углем, в результате чего происходит выделение летучих с полным удалением из нее остаточной влаги. Этот процесс может осуществляться одноступенчато или многоступенчато. Данный способ нагрева позволяет улучшить теплообмен, снизить вязкость пасты. Это приводит к существенному снижению потребности в энергии при эксплуатации системы подачи исходной реакционной смеси, особенно пастовых насосов и газовых компрессоров. Из технологической схемы исключается такой энергоемкий и сложный в управлении аппарат, как трубчатая печь нагрева.

Рециркуляция шлама применяется в процессах SRC, ITSL, EDS, H-Coal. При этом в процессе SRC улучшается качество растворителя после добавления в него тяжелого шлама. Применение тяжелого растворителя в двухстадийном процессе ожижения ITSL позволяет вовлечь в переработку 25 % остатков, а следовательно, уменьшить количество канцерогенных веществ на выходе. При этом в процессе SRC-I частично решается проблема утилизации остатков, что особенно важно, так как здесь шлам не подвергается газификации или коксованию. Рециркуляция шлама позволяет также использовать каталитическую активность металлов или минеральных компонентов угля, содержащихся в тяжелых остатках [5].

В бывшем Советском Союзе в Институте горючих ископаемых (ИГИ) в течение ряда лет проводились исследования по разработке научных основ и технологии нового процесса производства малосернистого моторного горючего, котельного топлива, химических продуктов, гидрогенизации переработки бурых и каменных углей [9]. Важным преимуществом технологии, созданной учеными ИГИ, стало осуществление процесса ожижения углей при давлении 10 МПа по сравнению с 30–70 МПа, ранее применявшимися в промышленности. Схема гидрогенизации угля по методу ИГИ показана на рисунке 1.

В основу данной технологии были положены новые принципы гидрогенизации угля (применение активного катализатора, иницирующих добавок, донора водорода). Хорошие результаты были получены при ожижении бурых углей Канско-Ачинского бассейна на укрупненной лабораторной установке ИГИ (табл. 1).

Разработанные в ИГИ технологические решения были воплощены в проектах первых в СССР опытно-промышленных установок СТ-5 и СТ-75. Они были выполнены проектно-конструкторскими организациями бывших Минуглепрома СССР, Миннефтехимпрома СССР и Минхиммаша СССР.



Т а б л и ц а 1

## Результаты опытной переработки канско-ачинского угля в условиях Опытного завода СТ-5

Показатели	Характеристика жидких продуктов, полученных гидрогенизацией бурого угля Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна		
	лабораторная установка	Опытный завод СТ-5	
		нефтяной пастообразователь	угольный пастообразователь
Плотность при температуре +20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,8904	0,8810	0,8763
Содержание, об %:			
– фенолы	6,5	6,7	8,1
– азотистые основания	3,2	2,1	4,1
Фракционный состав при различной температуре кипения, %:			
– начало кипения	82,0	78,0	42,0
– до 180 °С	6,8	10,1	10,9
– 180–260 °С	25,2	23,4	25,1
– 260–300 °С	19,4	17,7	19,8
– 300–400 °С	12,8	12,0	19,8
– выше 400 °С	35,3	36,6	23,2
– потери	0,5	0,2	1,2
Групповой углеводородный состав, %			
– непредельные	11,5	16,2	7,9
– ароматические	48,0	45,8	48,3
– парафиновые и нафтеновые	40,5	33,0	43,8
Содержание, % масс.:			
– сера	0,74	0,83	1,07
– азот	0,46	0,24	0,57

Примечание. Данные работы [11].

В результате гидрогенизационного облагораживания продуктов ожижения угля могут быть получены компоненты бензина, дизельного топлива, авиационного керосина и другие топлива, которые по своим свойствам аналогичны топливам, получаемым из нефти. При полной переработке бурого угля выход моторных топлив составляет 40–45 %. Наряду с топливными продуктами из угля можно получить ценные химические соединения — фенол, крезолы, ксиленолы, пиридин, лутидины, пиколины, бензол, ксилолы и др.

*Эффективность развития производства синтетического жидкого топлива на базе добываемых углей за рубежом*

В настоящее время США занимают ведущее положение среди промышленно развитых капиталистических стран по числу разрабатываемых процессов получения синтетического топлива из угля, по размерам ассигнований на мероприятия по подготовке к их крупномасштабному производству.

Из разрабатываемых в США методов получения синтетического жидкого топлива можно выделить процессы каталитической гидрогенизации, отличающиеся прогрессивными решениями и в значительной мере проверенные на крупных опытно-промышленных установках. При этом методе угольная паста подвергается гидрогенизации при давлении 13,5–18,5 МПа и температуре 450–465 °С. Часть жидкого продукта используется для приготовления пасты, а часть направляется на вакуумную дистилляцию, тяжелый остаток подвергается газификации для получения водорода [12].

Наличие в Российской Федерации значительного количества угольных месторождений со значительными запасами, рассредоточенных практически на всей территории страны, также актуализирует развитие технологий глубокой переработки угля с получением заменителя природного газа, электроэнергии, а также жидкого топлива и химических продуктов. В этой связи авторами статьи [13] выполнены расчеты, обосновывающие возможность получения синтетического жидкого топлива из газа ПГУ на Ланковском (Магаданская область), Ургальском (Хабаровский край), Шкотовском (Приморский край) угольных месторождениях. При этом предприятия в комплексе со станцией ПГУ, энергоустановкой и блоком синтеза можно характеризовать как горный энергохимический комплекс.

В качестве источника сырья рассматривался газ, получаемый при использовании дутья, обогащенного кислородом до уровня 45 %. При этом технологический процесс описывается следующим образом (рис. 2).

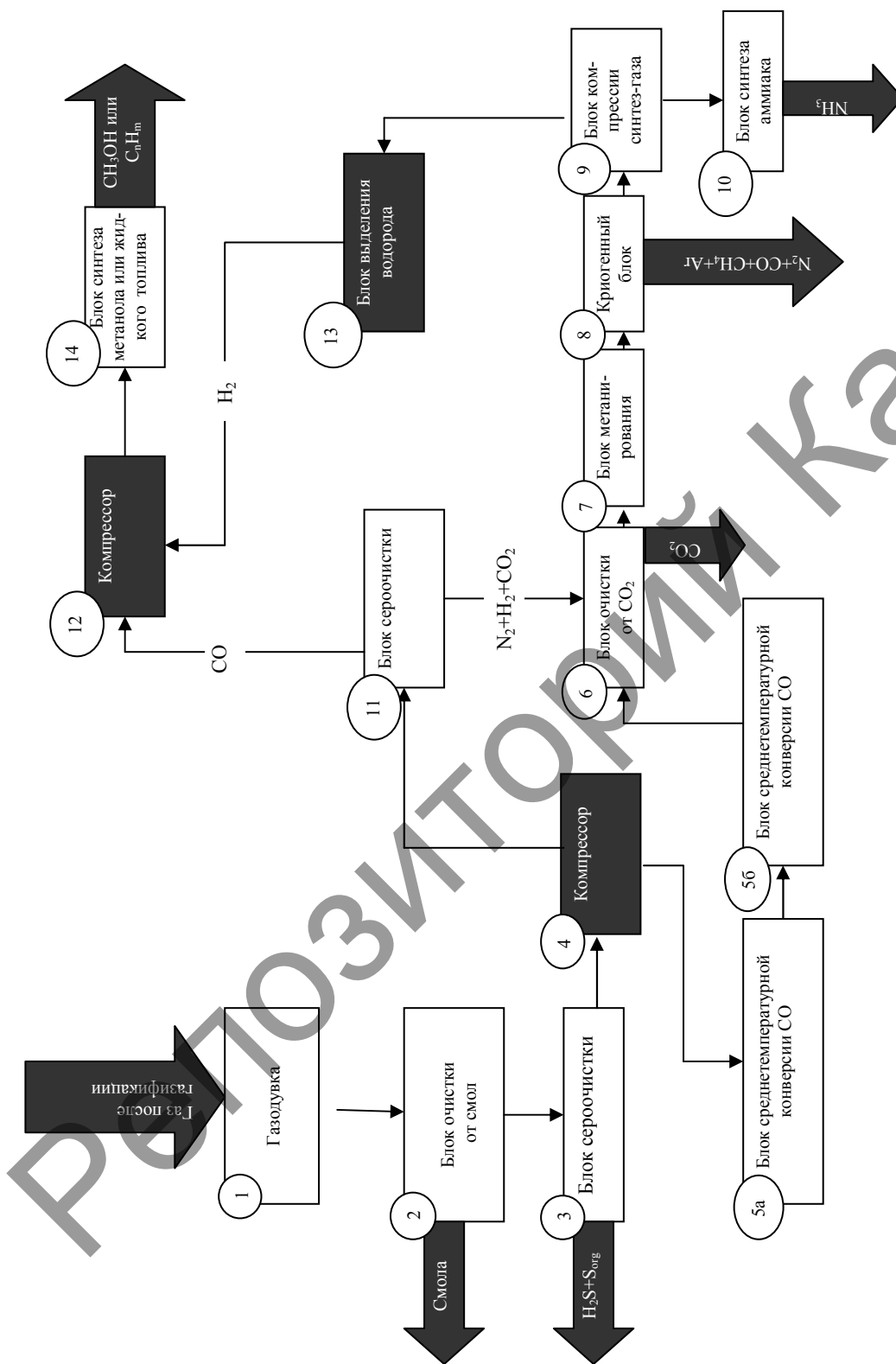


Рис. 2. Блок-схема производства аммиака, метанола и жидкого топлива из газа подземной газификации угля. (Примечание. Данные работы [13].)

На входе в поверхностный комплекс исходный газ сжимается газодувкой до давления около 0,2 МПа и затем поступает в установку 2 для выделения смол, затем в узел абсорбции 3 для удаления сероводорода. В качестве абсорбента используется метилдиэтаноламин (МДЭА). Этот процесс лучше проводить при низком давлении. Поглотительная способность МДЭА при сорбции  $H_2S$  высока при этих условиях, но мала для сорбции  $CO_2$ . Далее газ компримируют до 2–3 МПа (компрессор 4) и направляют в реактор 5, где протекает конверсия  $CO$  (в одну или две стадии).

После реактора конверсии  $CO$  газ направляют в секции 6, 7 и 8 для выделения  $CO_2$ , избыточного азота,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $Ar$ , метанирования и осушки газа. В секции 6  $CO_2$  и влага удаляются физическим абсорбентом, так называемым «Хайсолв-МТМ» (диметиловый эфир триэтиленгликоля). Этот процесс подобен хорошо известному процессу «Селексол». Далее происходит новая стадия компрессии 9 и синтез аммиака 10, который может быть использован в качестве попутного товарного продукта при производстве метанола.

Для производства метанола и жидкого топлива необходимо иметь газовую смесь, содержащую  $CO$ ,  $H_2$  при низкой концентрации азота. Поэтому часть газовой смеси направляют не на конверсию  $CO$ , а на стадию 11 для выделения  $CO$  специальным абсорбентом. Этот процесс назван МОК-процессом. Он был разработан несколькими фирмами: ТОНО Chemical Industry (Япония), ГИАП (Россия) и Каунасским университетом (Литва). Состав абсорбента основан на смеси солей меди, метатолуидина и «Хайсолв-МТМ» как разбавителя.

Для синтеза метанола и жидкого топлива необходимо также выделять концентрированный водород. Для решения этой задачи предлагается использовать короткоцикловую адсорбцию (КЦА, PSA — Pressure Swing Adsorption) или мембранную установку, стадия 13. Полученный водород и вновь скомпримированный оксид углерода направляются на стадии производства метанола (стадия 14).

Авторами [13] рассчитаны технико-экономические показатели предприятий на примере Ланковского месторождения.

При определении показателей был произведен расчет для двух типов предприятий:

1. Станция ПГУ + ТЭЦ (действующая станция).
2. Станция ПГУ + блок синтеза жидкого топлива (метанола). Срок службы предприятий по всем вариантам принимается не менее 50 лет.

Расчеты выполнены исходя из двух вариантов состава газа ПГУ, указанного в таблице 2.

Таблица 2

**Состав газа ПГУ, принятый для расчета поверхностного комплекса по производству синтетического жидкого топлива**

Состав газа	Дутье с концентрацией	
	$O_2$ — 21 %	$O_2$ — 45 %
$C_nH_mO_2$	0,2 %	0,2 %
$CO_2$	18,9 %	22,3 %
$H_2$	17,2 %	26,3 %
$H_2S$	0,4 %	0,2 %
$CO$	5,4 %	12,5 %
$CH_4$	2,5 %	3,0 %
$N_2$	54,5 %	35,5 %

*Примечание.* Данные работы [13].

Газ, полученный путем газификации с повышенным содержанием кислорода, используется для синтеза метанола.

Технико-экономические характеристики производства рассчитаны исходя из увеличения мощности предприятия по газу от 438 млн.  $m^3/год$  до 1410 млн.  $m^3/год$  для варианта Станция ПГУ + ТЭЦ и увеличения мощности предприятия по метанолу от 40 тыс. т до 120 тыс. т (438 млн.  $m^3/год$  до 3590 млн.  $m^3/год$  по газу) для варианта Станция ПГУ + Блок синтеза жидкого топлива (метанола).

В целом, выполненная экономическая оценка показала обоснованность инвестиций в предприятия по производству электроэнергии и жидкого топлива на основе технологии ПГУ. При этом рекомендуется рассматривать проекты строительства предприятий с максимальной мощностью, что обеспечит более высокую экономическую эффективность и более низкий срок окупаемости проекта. Как видно из

расчетов, срок окупаемости промышленных предприятий «ПГУ – ТЭЦ» и «ПГУ – Блок синтеза метанола» составит не более 4 лет, при этом средняя норма рентабельности составит 30–33 % [13].

Исследователи из Украины [14], учитывая большие запасы углей Северного Донбасса, а также их расположение вблизи промышленных предприятий, особенности минерального состава, не позволяющего сжигать без предварительной обработки на ТЭС, подвергать коксованию или полукоксованию, сделали попытку всесторонне изучить свойства этих углей для переработки нетрадиционными методами. Для гидрогенизации они использовали железо-щелочной и железо-молибденовый катализаторы. Анализ показал, что 40–50 % выделившихся газов составляют метан, этан и пропан, около половины — оксиды углерода. С использованием катализаторов выход газов увеличивается в 3–5 раз, а выход наиболее легкой жидкой фракции 100–200 °С (вероятно, смеси толуола и ксилолов) повышается в 5–7 раз. Существенное различие наблюдается и в распределении общей серы в продуктах. При некаталитической гидрогенизации 38 % серы содержится в остатке, 36 % в виде сероводорода — в газовой фазе, остальная — в растворимых фракциях, в присутствии катализаторов 53–54,5 % серы найдено в остатке, остальная — в растворимых фракциях.

В целом в ходе исследования ими выявлено, что на степень превращения длиннопламенных углей Петровского месторождения Северного Донбасса при гидрогенизационном ожигении большое влияние оказывают химический состав минеральной части и дисперсность распределения пирита в массе угля. Степень превращения не менее 90 % обеспечивается отмывкой углей от солей щелочных металлов, подбором условий проведения процесса и использованием дополнительных железосодержащих катализаторов. Угли являются хорошим перспективным сырьем для получения синтетических топлив и химических продуктов.

*Состояние развития глубокой химической переработки углей  
отдельных месторождений Республики Казахстан*

Развитие глубокой химической переработки углей отдельных бассейнов и месторождений является составной частью работы по улучшению структуры топливно-энергетического баланса Казахстана.

Учитывая это, в Институте органического синтеза и углехимии НАН РК разрабатываются методы получения синтетического жидкого топлива (СЖТ) из твердого топлива, тяжелых нефтяных остатков, высоковязких нефтей с помощью оксида углерода и воды или синтез-газа. В работе [15] приведены результаты исследования гидрогенизации угля месторождения Каражыра в среде синтез-газа.

Опыты были проведены во вращающемся автоклаве объемом 0,5 л при 325–400 °С. Начальное давление синтез-газа составило 4,5–5 МПа. В качестве пастообразователя использована высоковязкая нефть месторождения Каражамбас. Результаты опытов оценены по глубине превращения органической массы угля (ОМУ) в жидкие и газообразные продукты. Изучено влияние пяти факторов на гидрогенизацию угля (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

**Изучаемые факторы и их уровни**

Факторы	Уровни			
	1	2	3	4
$X_1$ — добавка к катализатору (%) красный шлам	0	1	2	3
$X_2$ — продолжительность, мин	0	30	60	90
$X_3$ — количество катализатора, %	0	2	4	6
$X_4$ — соотношение высоковязкая нефть/уголь	5:10	10:10	20:10	30:10
$X_5$ — температура, °С	325	350	375	400

*Примечание.* Данные работы [15].

Так как зависимость выхода жидких продуктов из угля от указанных выше факторов нелинейна, использован метод математического планирования, в основу которого положена нелинейная множественная корреляция. Переменные факторы варьировались на 4 уровнях. Факторный эксперимент проводился согласно матрице (матрица пятифакторного планирования экспериментов), где каждая строка соответствовала условиям проведения эксперимента.

В ходе исследования авторами были найдены следующие оптимальные условия гидрогенизации угля в среде синтез-газа:  $X_1$  — 3–5 %;  $X_2$  — 70–90 мин;  $X_3$  — 5–6 %;  $X_4$  — 3:1;  $X_5$  — 375–400 °С. В условиях оптимального режима степень превращения ОМУ составила 75,2 %, при выходе жидких — 70,2 %, в том числе фракция до 200 °С — 20,1 %, 200–300 °С — 37,3 %, выше 300 °С — 12,7; газа — 17,2 % [15].

В последнее время учеными ведущих научных учреждений в области химии и химической технологии твердого топлива исследуются следующие методы направленного воздействия на ОМУ:

- а) восстановительная деструкция;
- б) деструкция под «влиянием различных химически активных реагентов (гидролитическое расщепление, сульфирование и нитрование, хлорирование и др.)»;
- в) окислительная деструкция;
- г) термическая деструкция;
- д) термическая деструкция в среде органических растворителей.

В настоящее время, как показывают исследования [16, 17], наиболее перспективным для угля представляется физико-химическое диспергирование (ФХД), как не меняющее агрегатное состояние исходного угольного вещества. Сущность ФХД заключается в использовании неоднородности свойств органической массы угля: эффектов набухания и адсорбционного снижения поверхностной энергии (эффект Ребиндера). Соответствующий химический реагент, проникая в уголь по трещинам, приводит к снижению прочности, а в ряде случаев к разрушению сплошности углей. Природные факторы, значительно осложняющие разработку пластов на больших глубинах при традиционной технологии, с применением ФХД, наоборот, способствуют ей. Горное давление и напряженность пород интенсифицируют процессы разрушения, что при наличии обнажений в ряде случаев исключает необходимость предварительного воздействия на пласт. При физико-химических способах добычи предусмотрено повышение температуры, отпадающее с увеличением глубины разработки.

На сегодняшний день из 80 пластов Карагандинского бассейна примерно 1/3 имеют мощность менее 0,6 м, т.е. являются забалансовыми. Разработка их при существующем уровне механизации практически невозможна. Физико-химические методы добычи решили бы эту проблему.

Научными исследованиями установлено, что наиболее выгодно гидрировать малозольные бурые, длиннопламенные и газовые угли. При этом важное условие — высокое содержание в угле витринита. Это блестящий компонент, который почти полностью переходит в жидкое состояние.

В условиях Карагандинского бассейна зависимость диспергируемости угля от содержания витринита исследовалась на образцах, взятых с различных шахт бассейна, полуправильной формы (кубообразной и пластинчатой), механически не обработанных. Масса образцов — до 400 г. Они варьировались по петрографическому составу в зависимости от содержания витринита в угольном веществе (диапазон вариации — 35–90 % Vt). В целях интенсификации процесса диспергирования и повышения эффективности визуального наблюдения в качестве диспергирующего реагента взят 50 %-ный раствор соляной кислоты.

Карагандинский бассейн является одним из наиболее газоносных в мире. Газ, заполняя трещины и поры угольного вещества, препятствует проникновению реагента, уменьшает скорость развития трещины. Реагент, применяемый для ФХД, должен подаваться под достаточным давлением. При предварительной дегазации пласта освобожденные от газа трещины будут способствовать протеканию процесса диспергирования. Для реализации метода предложена технология добычи угля, предполагающая традиционную схему вскрытия пласта и нетрадиционную разработку блока с использованием физико-химического диспергирования [17].

Угольный пласт вскрывается стволom, по падению делится на выемочные столбы; последние — на блоки выработкими, закладываемыми твердеющей закладкой. Из выемочных выработок в блок бурятся скважины и нагнетается диспергирующий реагент. По обе стороны от блока монтируются бункер-распределитель и бункер-накопитель, соединяемые трубопроводами с напорной емкостью, находящейся на поверхности, и с выдачной скважиной, пробуренной на верхнюю техническую границу пласта. Пульпа приводится в транспортабельное состояние в бункере-накопителе. Для повышения надежности транспортировки и экономии утяжеленной жидкости предусмотрен ряд технологических приемов.

Таким образом, угли Карагандинского бассейна вполне возможно добывать физико-химическим способом.

В будущем необходимость экономии ресурсов нефти, резкое удорожание стоимости ее добычи в труднодоступных районах Западного Казахстана, целесообразность использования ее в большой химии, быстрый рост потребления моторного топлива, авиакеросина и автобензина — все это определяет целесообразность расширения сырьевой базы производства жидких топлив за счет практически неисчерпаемых угольных ресурсов в нашей республике. По сути в XXI веке «угольная» нефть должна придти к нам на смену нефти природной. Поэтому таким ведущим научно-исследовательским институтам республики, как ИОСУ, ИГД, ИПКОН НАН Республики Казахстан следует развернуть научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке отечественной технологии производства жидкого синтетического топлива из угля. Надо при этом иметь в виду, что сегодня известно уже два с лишним десятка технологических процессов ожижения угля, от лабораторных до опытных мощностью в 600 т перерабатываемого угля в сутки. Во многих из них применены новые технологические решения. Прежде всего, это касается числа ступеней переработки: с 4 в процессе «И.Г.Фарбениндустри» оно сокращено до 1–2 с выходом синтетической нефти или котельного топлива и до 2–3 при выпуске товарных моторных топлив.

Прогрессивные изменения стали возможны благодаря существенному ускорению процессов расщепления органического вещества угля и присоединения к нему водорода. Помимо испытания активных катализаторов в отдельных процессах, разрабатываемых как в нашей стране, так и за рубежом, в пасту добавляются в небольших количествах органические вещества. Они инициируют распад органической массы угля либо тормозят нежелательные реакции конденсации и обуглероживания первичных продуктов распада.

Достигнуты определенные успехи в интенсификации таких процессов, как отделение золы, разделение продуктов ожижения и утилизация твердых остатков. Недостаточно эффективное фильтрование при отделении твердых компонентов заменено в ряде процессов гидроциклонами (для агрегации осаждаемых твердых частиц используют так называемые антисольвенты), а также вакуумной ректификацией с последующей газификацией вакуумного остатка, содержащего все твердые и высокомолекулярные вещества. Существенный прогресс достигнут и в создании технологического оборудования; так действуют мощные реакторы объемом 123 м<sup>3</sup> (против 8 м<sup>3</sup> в традиционном процессе) [18].

И все же приходится признать, что усовершенствования технологических процессов остаются частными, а в целом современная технология еще во многом подобна традиционному методу «И.Г.Фарбениндустри». Аппаратура по-прежнему сложна и дорога, что предопределяет высокие капитальные затраты. Дорогое оборудование высокого давления из легированных сталей используется неэффективно из-за малых скоростей превращения сырья — угля. Повышение производительности установок не дает еще коренного перелома в технико-экономических показателях.

Обобщая все изложенное выше нам хотелось бы отметить, что существующие тенденции в изменении цен и структуры энергоресурсов делают прогноз производства СЖТ в Казахстане все-таки достаточно оптимистичным. На наш взгляд, из-за отсутствия собственной машиностроительной базы отечественная технология гидрогенизации может развиваться по пути изучения опыта зарубежных разработок и создания совместных предприятий.

*Оценка эффективности переработки природного газа и угля в ценные виды высокоэффективных и экологически чистых синтетических моторных топлив*

В настоящее время природный газ применяется главным образом как экологически чистый энергоноситель при производстве тепла и электроэнергии. Доля природного газа, используемого в качестве химического сырья, не превышает 1,5 %. Принимая во внимание тот факт, что только разведанные запасы природного газа (категории А + В + С) на территории Казахстана оцениваются более чем в 1,5 трлн. м<sup>3</sup>, перспективным направлением использования ресурсов природного газа уже в ближайшие годы должна стать химическая переработка газа в высокорентабельную продукцию, в частности, в синтетические жидкие углеводороды (СЖУ) [19].

Под термином СЖУ понимают практически всю продукцию углеводородного сырья, в частности, природного газа, в соединения, находящиеся в жидком состоянии при нормальных условиях (или легко сжижаемые при комнатной температуре). Это, прежде всего, оксигенаты, например, метанол, диметиловый эфир (ДМЭ), метил-третбутиловый эфир (МТБЭ); ширококипящая фракция углеводородов, например, синтетическая нефть (СН); отдельные углеводородные фракции, в частности, синтетические моторные топлива (СМТ).

В мировой практике все процессы химической конверсии природного газа в жидкие соединения объединены в одну категорию (Gas to Liquids — GTL). Перспективы развития и внедрения процессов GTL в мире обуславливаются следующими причинами [19]:

а) прогнозируемым на период между 2010 и 2020 годами максимальным уровнем добычи нефти в мире и неизбежным последующим спадом при одновременном увеличении спроса на моторные топлива;

б) ужесточением экологических требований к качеству моторных топлив;

в) необходимостью разработок отдаленных, труднодоступных месторождений природного газа, расположенных на значительном расстоянии от районов потребления, при отсутствии транспортной инфраструктуры. Внедрение крупнотоннажной технологии GTL непосредственно на месторождениях позволит газодобывающим компаниям осуществлять транспортирование огромного энергетического потенциала потребителям по более выгодной системе транспортировки жидких продуктов, например, морскими танкерами, в железнодорожных цистернах;

г) в качестве варианта разработки малодобитных и низконапорных месторождений природного газа. Строительство установки GTL небольшой мощности на таких месторождениях позволит удовлетворить потребность региона в топливе, убрав проблему дальнего и дорогостоящего завоза.

Синтетические углеводородные топлива, получаемые из природного газа по существующим в мире GTL-технологиям, характеризуются экологической чистотой, так как не содержат ароматических углеводородов, серы и азота.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, диверсификация и расширение основного производства на угледобывающих предприятиях за счет вертикальной интеграции может осуществляться и несколькими иными, не менее перспективными путями. Речь идет, прежде всего, о применении на угледобывающих предприятиях технологий и установок по переработке угля в особо ценные виды высокоэффективных и экологически чистых синтетических моторных топлив, таких, например, как диметиловый эфир (ДМЭ).

Применение этого высококачественного дизельного и энергетического топлива, альтернативного нефтяному, настолько перспективно, что и многие зарубежные компании и фирмы (BP, Marubeni, NKK, Air Products & Chemicals Inc.) ведут работы по промышленному освоению этого весьма привлекательного в коммерческом отношении направления. Это обусловлено тем, что ДМЭ как моторное топливо, в частности, имеет более высокое цетановое число (55–60 в отличие от 40–55 для нефтяного дизельного топлива), а при его сгорании в выхлопных газах практически отсутствуют сажа и оксиды азота.

Независимо от технологии промышленного синтеза ДМЭ, получение этого топлива проходит стадию образования метанола путем риформинга природного газа в синтез-газ (смесь водорода и окиси углерода), на которую приходится почти две трети общих энергетических затрат на процесс. Последующие же стадии каталитического превращения синтез-газа в смесь метанола и ДМЭ, а затем их разделения требуют значительно более низких энергозатрат, но являются достаточно капиталоемкими.

Сегодня некоторые зарубежные фирмы (NKK, Air Products & Chemicals Inc.) уже имеют опытно-промышленные технологии и установки производства ДМЭ из угля в шламовых реакторах, работающих при соотношениях  $H_2/CO$  от 0,7 до 1. По данным корпорации NKK (Япония), установка по производству 2500 т/сут ДМЭ будет перерабатывать 4000 т угля в сутки. Синтез ДМЭ осуществляется при температуре 250–270°C и давлении 30–70 атм, конверсия за один цикл прохода метанола составляет 55–60 % и на выходе реактора ДМЭ равна 95–99 %. Минимальная стоимость такой установки — 365 млн. долл. США [20].

Необходимо особо отметить, что при работе дизельных двигателей на синтетическом моторном топливе выбросы вредных веществ (несгоревшие углеводороды, моноокись углерода, окислы азота, диоксид серы, сажа) в атмосферу заметно ниже, чем при использовании нефтяных дизельных топлив. А это весьма важно для крупных городов и мегаполисов.

## References

1. Rozen B.Y. Contestants of oil and gasoline — M.: Bowels, 1985. — 112 p.
2. Krapchin I.P. Economic of recycling coals. — M.: Bowels, 1989. — 214 p.
3. Investigations in recycling coal technology in Great Britain // World of science. — 1982. — № 4. — P. 35–37.

4. Krichko A.A., Makariev S.V. To the question of obtaining fluid products from coal // Coal. — 1977. — № 2. — P. 44–47.
5. Chorkova N.N. Issues of chemical recycling of coal. Hydrogenisation // Coal. — 1992. — № 4. — P. 40–42.
6. Chikin A.A. Producing and using oil fuel of coal in SAR // Coal. — 1988. — № 12. — P. 50–52.
7. Derbyshire F., Davis A., Epstein M., Stausberry P. Temperature-staged catalytic coal liquefaction // Fuel. — 1986. — Vol. 65. — № 9. — P. 1233–1239.
8. Coal Liquefaction technology // Jap. Ind and Fechuol. Bull. — 1986. — Vol. 14. — № 1. — P. 9–14.
9. Bratchenko B.F. Coal energy. — M.: Bowels, 1981. — 48 p.
10. Semenov L.V. About synthetic fluid fuel production development // Coal. — 1981. — № 9. — P. 20–22.
11. Semenov L.V., Tarazanov I.G. Coal as a technical raw material // Coal. — 1989. — № 7. — P. 13–16.
12. Semenov L.V., Utenkova G.N. Perspectives of synthetic fuels of coal production in USA // Coal. — 1983. — № 2. — P. 56–58.
13. Belov A.V., Grebenuk I.V. Perspectives of the underground gasification coal gas chemical recycling with obtaining synthetic fluid fuel // Mining. — 2009. — № 3(85). — P. 36–38.
14. Osipov A.M., Chernishova M.I., Gvozd Y.F. Petrov coal deposit coal as a raw material for obtaining synthetical fluid fuel // Ukraine Coal. — 1989. — № 5. — P. 41.
15. Baikenov M.I., Ermagambetov B.T. et al. Optimisation of the coal deposit of Karazhira coal hydrogenisation in the synthesis-gas environment // Complex using of mineral raw material. — 1995. — № 4. — P. 81–84.
16. Semenov L.V. Economical aspects of rational utilization of coal resources and protection of environment: Survey. — M.: CNIE-coal, 1982. — 34 p.
17. Baidildina S.B. Evaluation of possibilities of the chemic-physical dispergation of Karagandy coal deposits // Complex utilization of mineral raw material. — 1989. — № 7. — P. 3–6.
18. Kalechits I.V., Aslanyan G.S. Synthetical fluid fuel of coal: look into the future // ЕКО. — 1985. — № 8. — P. 124–130.
19. Shakulikova G.K. To the analysis of alternative sources of obtaining fuel // Finances of Kazakhstan. — 2005. — № 6. — P. 72–77.
20. Ilyusha A.V. Main directions and peculiarities of coal-energy industry technological integrations // Coal. — 2002. — № 7. — P. 35–37.

УДК 662.754 547.26

## Возможное будущее старого процесса

### The possible future of the old process

Николаев А.И.<sup>1</sup>, Олувасегун Д.А.<sup>1</sup>, Филимонов А.С.<sup>1</sup>, Пешнев Б.В.<sup>1</sup>,  
Асилова Н.Ю.<sup>1</sup>, Татеева А.Б.<sup>2</sup>, Муратбекова А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В.Ломоносова, Россия;  
<sup>2</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: t.alma\_61@mail.ru)

Мақалада электрлі разрядтарда көмірсутектердің ыдырауы жайында қысқаша мәліметтер берілген. Авторлардың болжамы бойынша, осы процесті химиялық және мұнай-химиялық өндірістердің сұйық және газ тәрізді қалдықтарынан құнды өнімдер алу барысында қолданылу мүмкіндігі көрсетілген. Электрокрекинг газдарын бутендерді синтездеуде және көміртекті наноталшықтарды алу үшін қолдануға болады. Электрокрекинг газдарындағы ацетиленді көміртекті материалдарды пиротығыздау үшін және оның негізіндегі сибунит тәрізді көмірек-көміртекті композиттерді алу барысында пайдаланылады. Алынатын көмірек-көміртекті композиттердің қасиеттері синтезді жүргізу шарттарына байланысты болады.

This article is a brief review of investigations on hydrocarbon decomposition in electrical discharge. The authors' assumption about possible usage of this process in utilization of liquid and gaseous organic waste of chemical and petrochemical production for obtaining wide range of valuable products are suggested. Electrocracking gases can be used in buthens synthesis and for obtaining carbon nanofibres. The acetylene which is contented in electrocracking gas allows to use such gas in pyrocompaction of carbon materials and to obtain carbon-carbonic composites similar to sibunite. The properties of obtained carbon-carbonic composites depend on conditions of a certain stage of synthesis.

Процесс разложения углеводородов в электрической дуге известен давно и изучен достаточно подробно. Первые работы, выполненные в этом направлении Бертоло, датируются 1877 г. [1]. В 20–70 годах XX столетия исследования крекинга углеводородов в электрических разрядах проводились