



Европейская экономическая комиссия**Комитет по устойчивой энергетике****Группа экспертов по системам экологически
чистого производства электроэнергии****Семнадцатая сессия**

Женева, 6–8 октября 2021 года

Пункт 4 предварительной повестки дня

**Круглый стол по вопросам сочетания технологий
и инноваций: потенциал использования водорода
в регионе Европейской экономической комиссии
Организации Объединенных Наций****Возможности разработки и внедрения технологий
газификации угля для выработки электроэнергии,
комбинированной выработки тепло- и электроэнергии,
производства топливных элементов, химической
и специализированной продукции****Записка д-ра Эндрю Минченера, Генерального директора Центра
чистого угля МЭА и заместителя председателя Бюро Группы
экспертов по системам экологически чистого производства
электроэнергии****I. Введение**

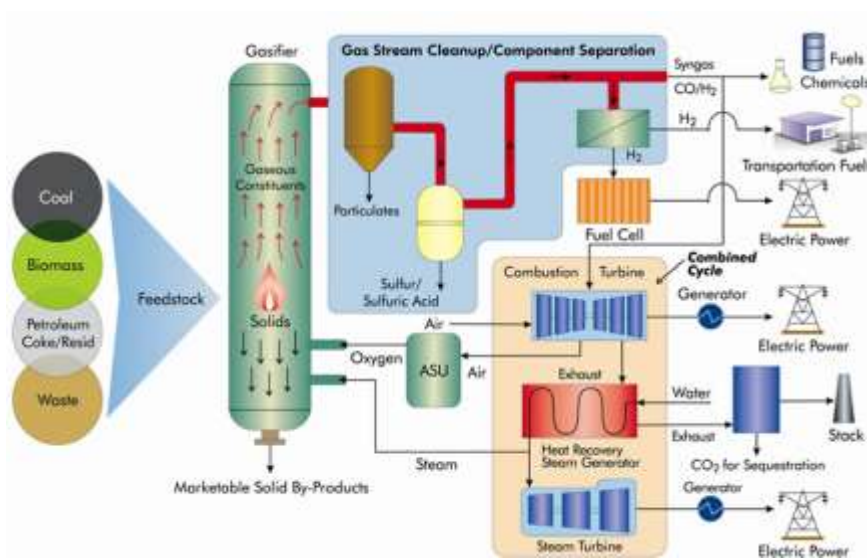
1. Газификация — это технологический процесс, в результате которого любое углеродсодержащее сырье, такое как уголь, биомасса и органические отходы, может быть преобразовано в топливный газ, также известный как синтез-газ (netl, 2021). Газификация обычно протекает при высоких температурах и давлении в емкости, где уголь или другое сырье вступает в непосредственное взаимодействие с кислородом (или воздухом) и паром, в результате чего образуется синтез-газ и остаток в виде золы/шлака. Синтез-газ состоит преимущественно из монооксида углерода (CO) и водорода (H₂), а также незначительных количеств метана и водяного пара, которые могут быть удалены. Полученная смесь CO/H₂ может либо использоваться сама по себе для различных целей, либо быть преобразована в водород и диоксид углерода (CO₂) посредством реакции каталитического окисления водяным паром в реакторе сдвига фаз «вода — газ». Эти два продукта могут быть легко разделены на два концентрированных газовых потока, в одном из которых будет находиться ценный источник чистой энергии, а во втором — газ с высоким содержанием углерода, который может быть использован в различных процессах или помещен на хранение в геологических породах.



2. Варианты использования как исходного синтез-газа, так и конечного продукта, водорода, могут включать в себя генерацию электроэнергии, комбинированную выработку тепло- и электроэнергии, производство широкого спектра продукции, такой как удобрения и аммиак, а также бензина и дизельного топлива. Производить целый ряд таких продуктов и вырабатывать электроэнергию можно с помощью одной установки, что называется полигенерацией, и такую возможность дают исключительно технологии газификации. На рис. 1 изображена схема организации процесса газификации угля с присущей ему гибкостью в отношении исходного сырья, широкий спектр его продуктов и полезность технологии газификации.

Рис. 1

Возможности использования технологии газификации для выработки электроэнергии и производства различной продукции (netl.doc, 2021)



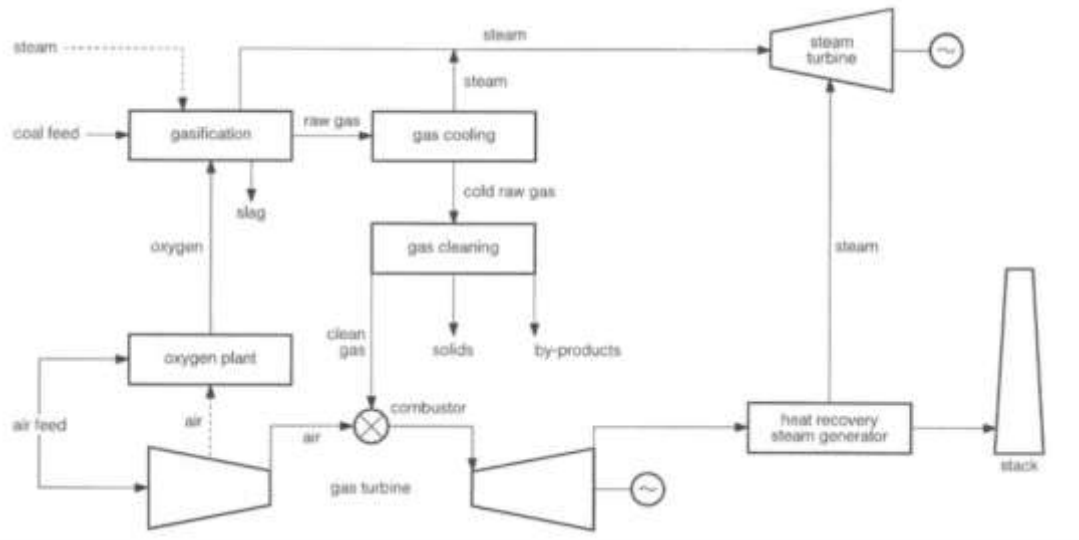
II. КЦКГ для выработки электроэнергии/комбинированной выработки тепло- и электроэнергии: уровень развития и ситуация с внедрением технологий

A. Промышленное применение

3. В комбинированном цикле комплексной газификации (КЦКГ) углеродсодержащее сырье превращается в газ, а полученный синтез-газ (чаще всего состоящий из CO и H₂) очищается от газообразных загрязняющих веществ и дисперсных частиц, а затем сжигается для приведения в действие газовой турбины. Тепло выхлопных газов газовой турбины может быть использовано для получения пара, который будет приводить в действие паровые турбины для выработки дополнительной электроэнергии (рис. II). Кроме того, теплота более низкой температуры может использоваться в промышленных и бытовых системах отопления, хотя в этом случае потребуется значительная инфраструктура для подачи горячей воды на предприятия и в жилые дома.

Рис. II

Упрощенная схема процесса выработки электроэнергии в рамках КЦКГ на основе угля (Henderson 2008)



В. Технологии газификации угля

4. Технология КЦКГ является сложной. Она включает в себя несколько ключевых подсистем, каждая из которых влияет на общую эффективность и другие характеристики, связанные с производительностью, такие как затраты и надежность. К таким подсистемам относятся:

- газогенератор;
- система газоочистки;
- установка для получения кислорода;
- газотурбинная установка;
- установка для охлаждения синтез-газа, теплоутилизационный парогенератор, паротурбинный цикл;
- системы улавливания CO_2 на основе реактора сдвига фаз «вода — газ» для производства водорода (на рисунке не показан).

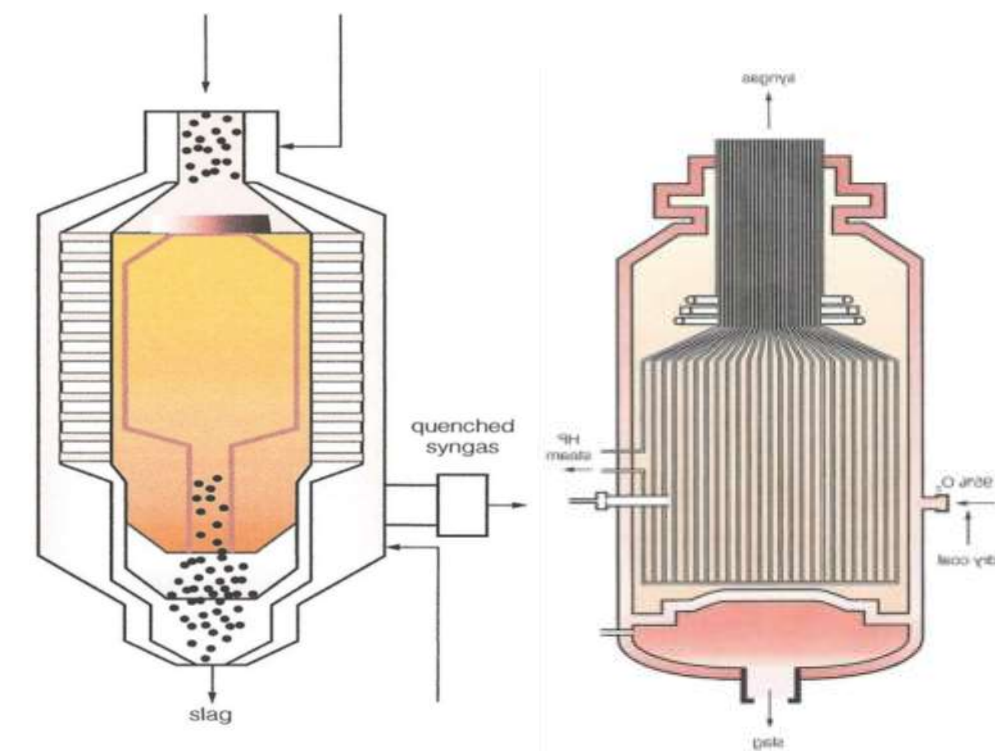
5. Из всех этих компонентов новым является лишь система газификации, поскольку во всех остальных перечисленных системах применяются известные технологии, хотя и используемые для других целей. Существуют три основных типа установок для газификации угля, а именно: газогенераторы пылевого потока, газогенератор с подвижным слоем и газогенератор с кипящим слоем; они различаются по классу угля, для которого они более всего подходят, агрегатному состоянию образующейся золы (сухая зола или жидкий шлак), подготовке угольного топлива и системе его подачи, используемому окислителю (кислород или воздух), способу золоудаления, давлению и температуре в зоне газификации, и температуре газа на выходе (Fernando R, 2008).

6. В большинстве КЦКГ применяются поточные газогенераторы, поскольку они нетребовательны в плане используемого топлива, вырабатывают пар высокого давления, а в получаемом в них газе отсутствуют смолы. Они функционируют в режиме жидкого шлакоудаления при высоких температурах, варьирующихся в пределах 1200–1600 С, при давлении около 2,5 МПа, так что угольная зола остается в жидком состоянии, и почти во всех из них для обдува используется кислород (рис. III). Газы, выходящие из газогенератора, требуют значительного охлаждения перед очисткой. Для этого используется один из двух методов: охлаждение в газоохладителе

(например, в модели компании «Шелл») или водный квенч (например, в модели компании «Дженерал электрик»).

Рис. III

Примеры: газогенератор пылевого потока на сухом топливе «Шелл» и газогенератор пылевого потока «Дженерал электрик», в который подается топливная суспензия (netl, 2013b)

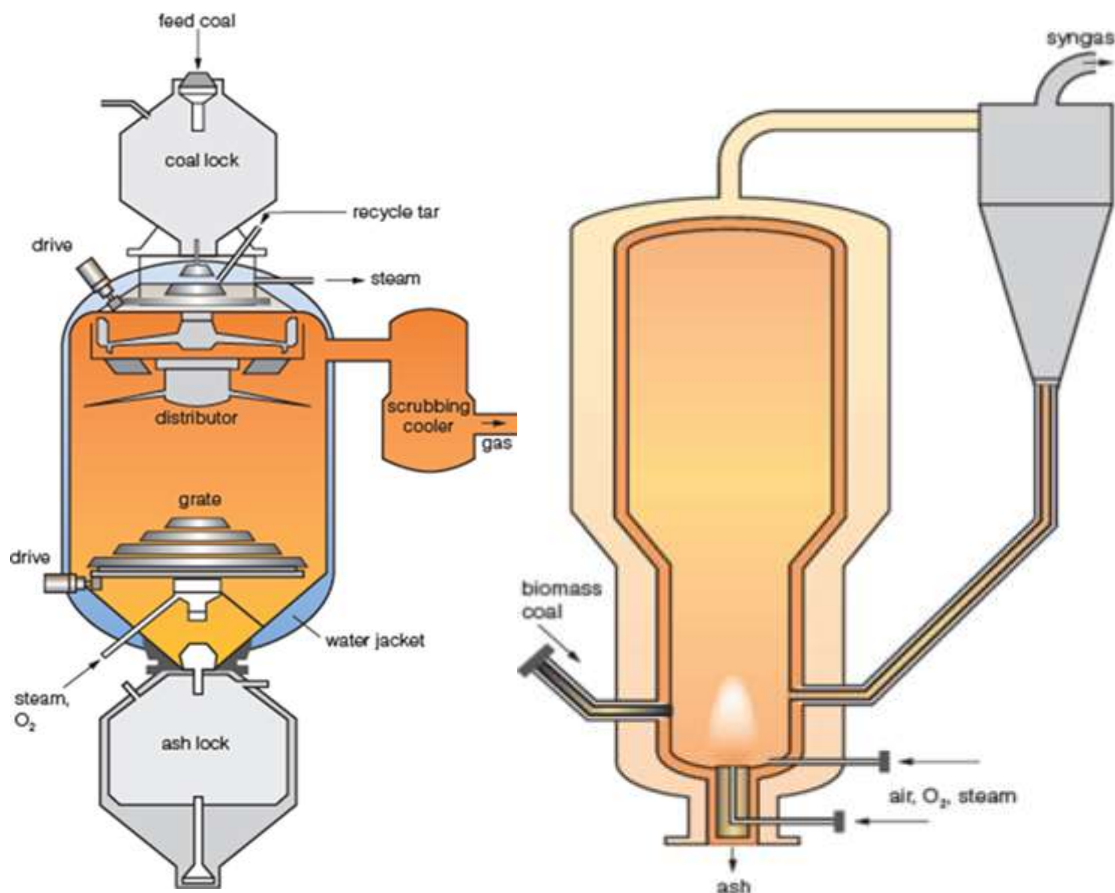


7. В газогенераторы пылевого потока могут подаваться любые типы угля независимо от его сорта, спекаемости и доли мелких фракций, хотя для достижения высокого КПД при приемлемых капитальных затратах предпочтительно использовать исходное топливо с низкой зольностью. Чтобы шлак мог стекать по стенкам газогенератора, его вязкость должна быть достаточно низкой. Время пребывания газовой смеси в газогенераторе составляет всего несколько секунд, что обеспечивает высокую производительность, но требует измельчения угля до частиц размером менее 0,1 мм. Высокая степень конверсии углерода в этих реакторах и получение синтез-газа, не содержащего смол и фенолов, достигаются за счет равномерно высокой рабочей температуры. Они отличаются относительно большим расходом окислителя, и высокой теплотой сгорания образующегося газа. Высокие рабочие температуры влияют на срок службы горелок и футеровки и требуют применения в конструкции дорогостоящих материалов, а также использования сложных высокотемпературных теплообменников для охлаждения синтез-газа.

8. Еще одной разновидностью газогенераторов являются газогенераторы с неподвижным слоем, в которых в верхнюю часть установки подается кусковой уголь, в то время как снизу подаются кислород и пар. Газы поднимаются вверх через слой угля, а зола, сухая или в виде шлака, удаляется через нижнюю часть. Существуют два варианта этой технологии, а именно: система «Лурги» — «Сасол» с сухим дном и система «Бритиш гас» — «Лурги» с бассейном для шлака.

Рис. IV

Схема устройства газогенератора «Лурги» — «Сасол» с сухим дном и газогенератора «Ю гас» с кипящим слоем (NETL 2013a и 2013c)



9. Газогенератор с сухим дном «Сасол» — «Лурги» представляет собой сосуд под давлением 3 МПа с двойными стенками, пространство между которыми заполнено кипящей водой (см. рис. IV). Это позволяет интенсивно охлаждать стенки и одновременно генерировать пар. Кислород и пар поступают в реактор снизу и распределяются по слою с помощью колосниковой решетки, а кусковой уголь подается через верхнюю часть. Уголь должен обладать низкой спекаемостью, и размер частиц должен быть в диапазоне 5–50 мм, чтобы не препятствовать току окислителей в реакторе. В этом газогенераторе за счет высокого соотношения пара к кислороду в реакционной зоне поддерживается температура около 1000°C, что ниже температуры плавления золы. Благодаря большому количеству пара соотношение водорода к монооксиду углерода в получаемом синтез-газе высоко. Из-за более низкой температуры процесса этот тип газогенератора наиболее подходит для высокорекреационных углей. Газы, выходящие из зоны газификации, попадают в верхнюю часть реактора, где происходит просушка, предварительный нагрев подаваемого угля и где из него выходят летучие вещества. В процессе синтез-газ охлаждается с приблизительно 800°C до приблизительно 550°C на выходе из реактора. Зола удаляется через вращающуюся решетку и выгружается в шлюзовый бункер. Она охлаждается подаваемым кислородом и паром до температуры 300–400°C. Из-за такой относительно низкой температуры на выходе концентрация метана, смол и фенолов в получаемом синтез-газе относительно высока. Для удаления нежелательных углеводородов и пыли выходящий из реактора синтез-газ необходимо промывать. Из жидкости, образовавшейся в результате такого промыва, сначала удаляются путем механической сепарации смолы, а затем посредством процесса экстракции из нее удаляется фенол. После этого селективно удаляются серосодержащий газ и аммиак.

10. Газогенератор «Бритиш Гас»/«Лурги» («БГЛ») представляет собой разновидность газогенератора «Лурги», отличающуюся тем, что в ней образуется шлак. Этот газогенератор подходит для углей с низкой температурой плавления золы и рассчитан как на кусковое, так и на мелкодисперсное угольное топливо. По сравнению с газогенератором «Лурги» газогенератор «БГЛ» имеет повышенный выход CO и увеличенную пропускную способность реактора. Он отличается более высокой эффективностью конверсии угля в синтез-газ при меньшем потреблении пара. Минеральные вещества удаляются в виде невыщелачиваемого стекловидного твердого вещества (Collot, 2002). В этом газогенераторе не образуется золыная пыль, а шлак представляет собой плотную стекловидную крошку, которая не выщелачивается, инкапсулирует элементы, содержащиеся в следовых количествах, и может использоваться в качестве строительного материала. В отличие от газогенератора пылевого потока, в газогенераторе «БГЛ» не образуется пар высокого давления, поскольку теплообмен происходит, по сути, между получаемым газом и слоем угля. Поскольку в этой технологии не требуется пара, получаемый с ее помощью синтез-газ подходит для использования в качестве химического сырья.

11. Еще один тип газогенератора — это газогенератор с кипящим слоем (рис. IV) на основе стационарной или циркуляционной технологии, где газификация топлива осуществляется на слое инертных частиц, удерживаемых восходящим потоком дутья. В зависимости от предназначения синтез-газа, этот слой может состоять из смеси песка, кокса, древесного угля, сорбента или золы. Дробленый уголь с размером частиц 0,5–5 мм подается в реактор сбоку, в то время как пар с воздухом или кислородом поступают в основном снизу, за счет чего происходит псевдооживление слоя. Время пребывания исходного топлива в газогенераторе обычно составляет 10–100 секунд. За счет сильного обратного перемешивания достигается равномерное распределение температуры в газогенераторе. Рабочая температура таких газогенераторов ниже температуры плавления золы и колеблется в пределах 900–1050 °C, что не дает золе плавиться, позволяет исключить шлакообразование в золыной части сырья и не нарушает псевдооживленности слоя. В качестве дутья в них используется воздух. Из-за невысокой рабочей температуры процесс газификации может быть неполным, в результате чего в полученном синтез-газе остаются частицы угля, которые удаляются с помощью циклона и возвращаются в газогенератор. Кроме того, из-за низких рабочих температур газогенераторы кипящего слоя наиболее подходят для относительно реакционноспособных видов топлива, таких как бурый уголь и биомасса. Немаловажен и размер частиц. Если размер частиц слишком мал, их будет выносить из слоя потоком синтез-газа, даже несмотря на частичное улавливание их циклоном и возвращение в зону газификации. В свою очередь количество полукокса, удаляемого из слоя газогенератора, и количество углерода в пыли, вынесенной из газогенератора и циклона и осевшей на фильтрах, сказывается на предельном значении конверсии угля.

12. На работу газогенераторов кипящего слоя влияет множество факторов, в том числе свойства угля, в частности реакционная способность образующегося из угля полукокса, которая должна быть достаточно высокой. Быстрое снижение реакционной способности полукокса по мере газификации является одной из основных проблем, требующих решения для повышения степени конверсии углерода в этих газогенераторах. Поэтому в газогенераторах кипящего слоя, как правило, рекомендуют использовать угли с высокой реакционной способностью, такие как бурые угли, лигниты, полубитуминозные и в некоторой степени битуминозные угли с высоким содержанием летучих. Одной из основных составляющих материала слоя служат содержащиеся в угольном топливе минеральные вещества, поэтому работа газогенератора зависит и от свойств угольной золы.

С. Ситуация с внедрением КЦКГ в мире

13. На сегодняшний день число действующих газогенераторных электростанций очень ограничено, что отчасти является следствием консерватизма энергетического сектора и опасений, связанных с тем, что первые в своем роде установки более

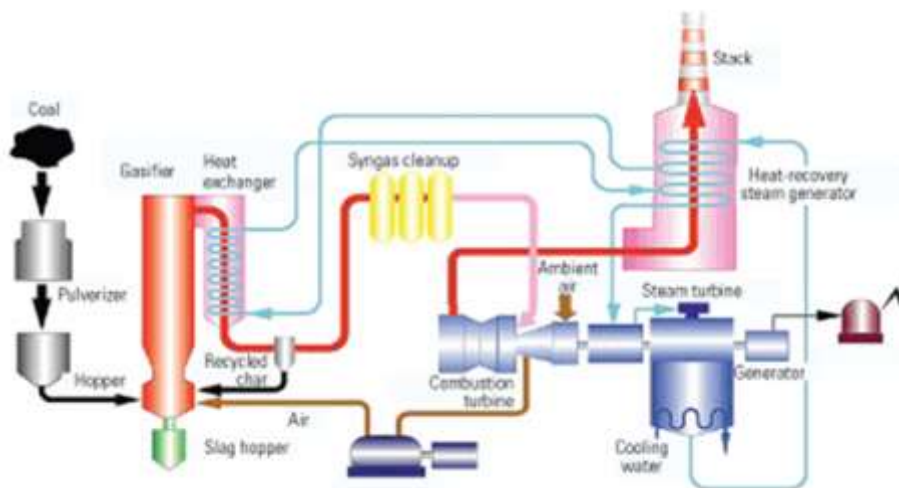
затратны, а следовательно, менее привлекательны по сравнению с современными угольными энергетическими установками. В 1994–2016 годах было запущено семь демонстрационных промышленных установок («Буггенум» в Нидерландах, «Уобаш ривер» в США, «Полк Пауэр» в США, «Пуэртольяно» в Испании, «Накосо» в Японии, «Кулджен» в Японии, «Хуанен» в Китае), одна промышленная экспериментальная установка («Игл» в Японии), одна модернизированная установка («Вресова» в Чехии) и одна коммерческая установка («Эдвардспорт» в США).

14. Впоследствии установка «Накосо» мощностью 250 МВт_э была введена в полноценную промышленную эксплуатацию, и в настоящее время на этой площадке строится еще два энергоблока увеличенной мощности 540 МВт_э на основе проекта «Накосо».

15. В этих демонстрационных установках применены разные типы газогенераторов с кислородным или воздушным дутьем, различные методики экологического контроля и газотурбинные установки при различных уровнях интеграции систем. На всех установках кроме новейших («Накосо», «Эдвардпорт» и «Хуанен») приходилось устранять различные технические препятствия для достижения приемлемого уровня надежности системы и соответствующей эксплуатационной готовности. В целом газогенераторные электростанции на угле имеют сложное устройство. Более высокая степень интеграции дает более высокий тепловой КПД, но запуск электростанций, спроектированных таким образом, занимает длительное время, поскольку отдельные технологические участки необходимо вводить в эксплуатацию в правильной последовательности; кроме того, такие электростанции отличаются меньшей гибкостью по сравнению с менее интегрированными и менее эффективными проектами. При проектировании будущих объектов предпочтение отдается частичной интеграции, поскольку это позволяет более быстрый запуск и большую эксплуатационную гибкость при сохранении преимущества в плане КПД, которое дает подача воздуха в газовые турбины.

Рис. V

Демонстрационная установка КЦКГ «Накосо» мощностью 250 МВт_э (Mitsubishi Power, 2021)



III. Применение технологии газификации для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии

Справочная информация

16. Во многих промышленно развитых странах жилые дома, как правило, высотные, и промышленные помещения традиционно отапливались остаточным

теплом от угольных электростанций. В связи с этим требовалась масштабная инфраструктура для транспортировки низкосортного пара от электростанции до бытовых и промышленных объектов. Однако, несмотря на то, что такие схемы оказались более эффективными по сравнению с системами, предполагающими исключительно выработку электроэнергии, фактическое распределение энергии часто было неэффективным, и возможности индивидуального контроля поставляемой энергии были невелики.

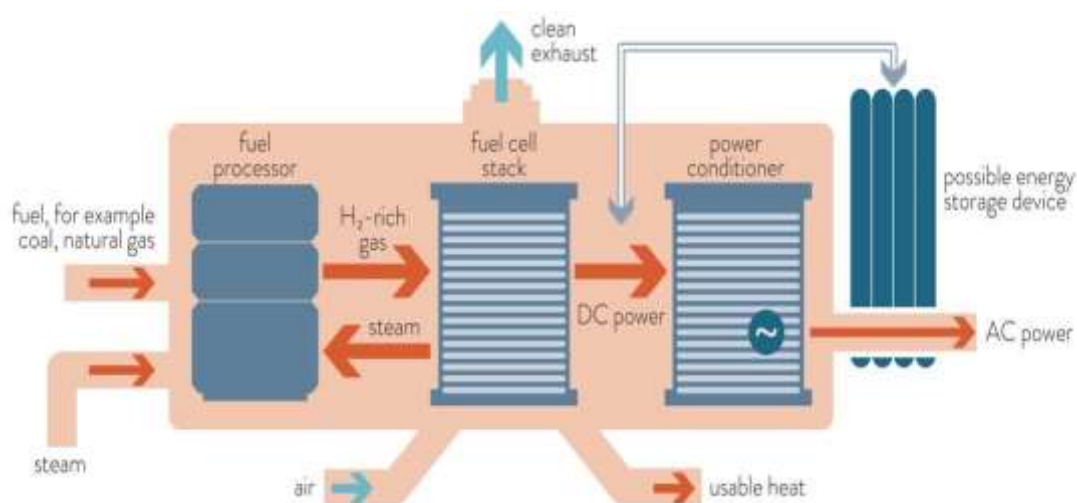
17. В настоящее время наблюдается стремление к комбинированной выработке тепло- и электроэнергии на газе, обычно с помощью поршневых двигателей, работающих на газовом топливе, которые часто приводятся в действие за счет сжигания природного газа, сжиженного нефтяного газа, или биогаза. В таких системах двигатель приводит в действие генератор переменного тока, благодаря чему вырабатывается электроэнергия, а тепло от этого двигателя рекуперируется и преобразуется в горячую воду или пар. Тем самым удастся добиться высокого КПД. Однако сегодня существуют весьма серьезные ограничения, касающиеся углерода, использование любых ископаемых видов топлива вызывает опасения, и как следствие возник запрос на ограничение выработки энергии на основе угля и газа. Это слишком упрощенный взгляд, поскольку существуют такие способы использования угля и газа, которые позволяют сократить выбросы углерода почти до нуля и добиться высокого КПД.

IV. Потенциал разрабатываемых топливных элементов

18. Один из разрабатываемых в настоящее время подходов предполагает использование водородных топливных элементов, в которых химическая энергия топлива преобразуется посредством электрохимической реакции в электрическую (и тепловую); такие элементы имеют высокий КПД в плане выработки энергии и не оказывают значительного воздействия на окружающую среду. Топливные элементы могут применяться на крупных стационарных установках для выработки электроэнергии, в децентрализованных комбинированных системах выработки тепло- и электроэнергии и в передвижных энергетических установках, для чего существуют различные виды топливных элементов (Zhang, 2019).

Рис. VI

Схема энергосистемы на топливных элементах (Nehrir and Wang, 2016)



19. Топливные элементы — это электрохимические устройства с высоким КПД, в которых происходит преобразование химической энергии участвующих в реакции веществ непосредственно в электрическую и тепловую энергию. При подаче топлива выработка электроэнергии в них происходит непрерывно. Одноэтапный характер этого процесса перехода от химической к электрической энергии имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами выработки электроэнергии, которые включают в себя несколько этапов преобразования энергии из химической в тепловую, механическую, а затем в электрическую. К числу этих потенциальных преимуществ относятся высокая эффективность при комбинированной выработке тепла, охлаждении и производстве электроэнергии (электрический КПД до 60 %, комбинированный КПД при когенерации более 90 %), высокая плотность энерговыделения, малый углеродный след, низкий уровень выбросов, низкий уровень шума и высокое качество электроэнергии. При применении топливных элементов на угольной электростанции выделяемый CO_2 может иметь высокую концентрацию и быть более удобным для улавливания. Топливные элементы устроены по модульному принципу и уменьшение их размеров не влечет за собой увеличения расхода энергии.

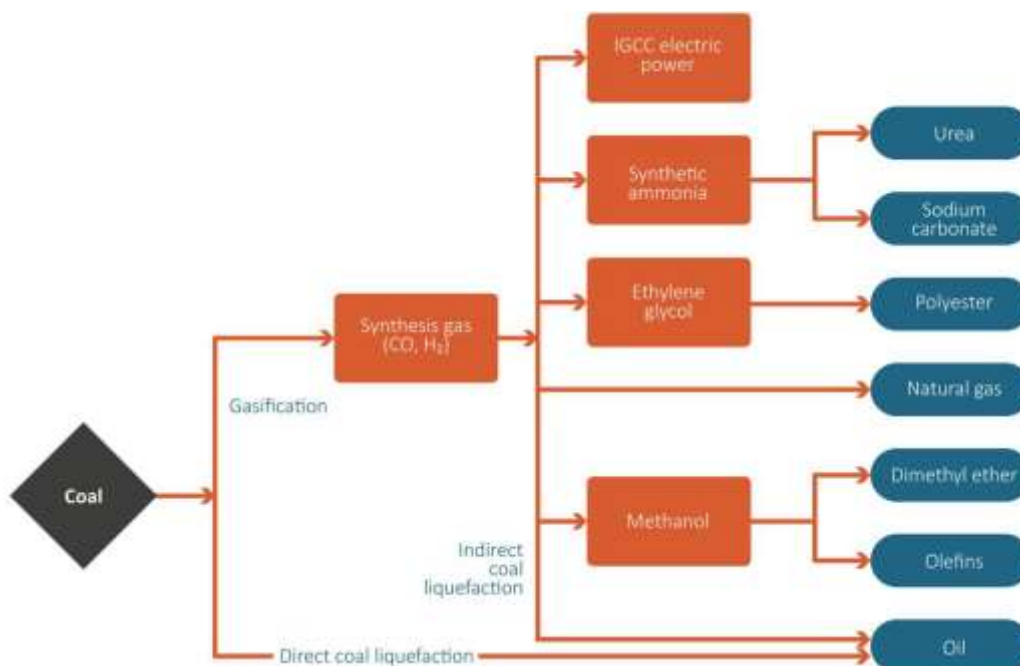
20. В случае с крупными стационарными электроэнергетическими установками интеграция топливных элементов с высокой рабочей температурой с процессом газификации угля может послужить одним из способов создания сверхвысокоэффективной энергетической системы с низким уровнем выбросов. Министерство энергетики США поощряет научно-исследовательские работы в области технологий топливных элементов в рамках таких исследовательских программ, как «Альянс за преобразование энергии твердотельных топливных элементов» (SECA), и ставит своей целью создать демонстрационную комбинированную энергетическую систему с использованием технологии газификации и топливных элементов мощностью 10 МВт и комбинированную энергетическую систему с использованием технологии газификации и топливных источников мощностью 50 МВт к 2025 году. Общей проблемой стационарных топливных элементов является уровень издержек и срок службы элементов. Ожидается, что демонстрационная комбинированная энергетическая система с использованием технологии газификации и топливных элементов позволит доработать эти технологии для выработки электроэнергии и сделать их более экономичными и перспективными.

21. Первой демонстрационной электростанцией такого типа, создаваемой при поддержке государства, стал проект «Кулджен», реализуемый в Японии. Как показано на рис. VII, она включает в себя установку КЦКГ пылевого потока с кислородным дутьем мощностью 166 МВт с возможностью производства водорода путем пропускания части синтез-газа через каталитический реактор, при этом побочный продукт в виде CO_2 направляется на утилизацию или хранение. Это позволяет использовать в КЦКГ исключительно водородное топливо с возможностью направить часть получаемого газа в качестве топлива для топливных элементов. Первоначально установка будет работать на смеси синтез-газа и водорода, однако ее производительность будет повышена за счет интеграции энергии, вырабатываемой топливным элементом.

22. На сегодняшний день возможность эксплуатации КЦКГ не вызывает сомнений, и теперь стоит задача доказать возможность улавливания и транспортировки за пределы станции не менее 90 CO_2 , образующегося в реакторе. После этого будет доказана способность топливного элемента вырабатывать электроэнергию с использованием образующегося в реакторе водорода. Общая цель — продемонстрировать к 2025 году, что комбинированный цикл с использованием технологий газификации и топливных элементов может достичь чистого теплового КПД в 55 %.

Рис. VIII

Схема гибких возможностей использования процесса газификации для получения различных конечных продуктов (Seeking Alpha, 2012)



25. Это обеспечивает принципиальную возможность удовлетворять важные стратегические потребности, особенно в ряде развивающихся и промышленно развитых странах, где уголь является основным источником топлива, а нефть и газ может быть доступны лишь в ограниченных количествах. Кроме того, это поспособствует достижению сбалансированного решения энергетической трилеммы, в которой приходится выбирать между энергетической безопасностью, экономической привлекательностью и, при наличии соответствующих систем контроля, приемлемым уровнем воздействия на окружающую среду.

26. Существует несколько предварительных условий для внедрения этой технологии (Minchener 2019). Так, необходимы:

- большие запасы дешевого пригодного для газификации угля, как правило, в виде активов, не используемых из-за низкого качества или неудобного расположения;
- способность и желание правительства принимающей страны обеспечить поддержку требуемых весьма крупных капиталовложений;
- возможность покрыть расходы на инфраструктуру, необходимую как для поставки сырья, так и для транспортировки конечной продукции; и
- средства, для того чтобы обеспечить удовлетворение потребностей в соответствующем институциональном потенциале.

В. Внедрение технологии

27. Первоначально широкомасштабное промышленное внедрение этой технологии было начато в Южной Африке в тот период, когда импорт нефти в эту страну был затруднен по политическим причинам. С тех пор в стране продолжается производство синтетического топлива путем сжижения угля, а основные предприятия по производству из угля химического сырья были переведены на использование в качестве сырья природного газа (Sasol, 2010).

28. Позднее в США было создано демонстрационное предприятие по производству из угля синтетического природного газа, но эта технология не получила дальнейшего развития из-за наличия более дешевых альтернативных источников газа (netl, 2020).

29. В настоящее время лидером в этой области является Китай, которому удалось создать крупномасштабный сектор промышленной переработки низкосортных сортов угля и сформировать соответствующую финансовую базу. Он может служить образцом крупномасштабного внедрения технологий переработки угля в химическую продукцию, газообразное и жидкое топливо на всех этапах цикла промышленного развития. В 2019 году химическому сектору Китая потребовалось 250 млн т угля, и эта цифра значительно возрастет по мере ввода в эксплуатацию новых производственных мощностей (Reid 2021). Этот сектор по-прежнему привлекает крупные инвестиции: в 2018–2020 годах было введено в эксплуатацию 150 новых предприятий, а к 2023 году планируется завершить строительство еще 220 заводов.

30. В той части сектора, которая специализируется на производстве синтетического топлива, основными направлениями являются конверсия угля в жидкое топливо или в синтетический природный газ. В случае таких крупномасштабных проектов огромные первоначальные инвестиции в капитал включают расходы на строительство самой установки по переработке угля, а также сопутствующей инфраструктуры. Себестоимость угля достаточно хорошо поддается оценке и обычно относительно стабильна. Стоимость же нефти и газа, из которых также можно производить ту же конечную продукцию, всегда отличалась большей волатильностью. Следовательно, трудно оценить общую рентабельность в течение номинального 50-летнего срока службы, поскольку возможны периоды, когда конечные продукты на основе нефти и газа будут более конкурентоспособными, чем их аналоги на основе угля (Minchener, 2019).

31. Как в Китае, так и за его пределами сохраняется обеспокоенность по поводу высокой стоимости поставок и неопределенности цен на нефть и газ по форвардным контрактам. Например, падение международных цен на нефть в 2014 году с более 100 до 30 долл. США за баррель серьезно сказалось на всей программе Китая в секторе конверсии угля. Цена на нефть, при которой эти процессы по производству топлива будущего становятся безубыточными и номинально финансово привлекательными, — это международная цена на сырую нефть, превышающая 60 долл. США за баррель, хотя она варьируется в зависимости от применяемой технологии, стоимости угля и местной конъюнктуры.

32. За реализацию программы Китая по преобразованию угля в химическую продукцию отвечает Государственный комитет по делам развития и реформ, который формирует политику в области экономического и социального развития, обеспечивает сбалансированность экономического развития и руководит реструктуризацией экономической системы (Woodall B, 2014). В рамках своих планов по ограничению возможной будущей уязвимости перед более дешевым импортом некоторых видов продукции, Китай ввел централизованное утверждение новых проектов по переработке угля. Помимо введения различных ограничений в области водопользования, энергоэффективности и охраны окружающей среды, он также ввел требование для разработчиков проектов доказывать, что впоследствии они будут в состоянии решить проблему интенсивности выбросов CO₂.

33. В этом секторе технологии переработки угля в метанол, диметиловый эфир и водород считаются зрелыми. Водород, получаемый из угольного сырья — конкурентное безуглеродное топливо и сырье для использования в производственных и промышленных процессах, таких как производство цемента и выплавка стали, транспорт, производство промышленного сырья, отопление/электроснабжение зданий, а также выработка электроэнергии.

34. Сегодня, когда удалось преодолеть значительные трудности, технология переработки угля в жидкое топливо эксплуатируется надлежащим образом, расширяются масштабы ее использования, идет строительство промышленных установок-прототипов (например, установка по конверсии угля в жидкое топливо

мощностью 2 млн т/год в Нинся-Хуэйском автономном районе). В случае же переработки угля в синтетический природный газ возникли сложности с обеспечением требуемых эксплуатационных показателей, вызванные отчасти выбором типа газогенератора для первых демонстрационных установок; кроме того, не всегда удавалось соблюсти необходимые экологические требования. Правительство пересмотрело свой подход, сделав ставку на импорт газа и ужесточив процесс утверждения новых установок в соответствии с национальной политикой.

C. Ситуация с применением технологии выработки водорода из угля

35. В настоящее время отмечается растущий интерес к водороду как к безуглеродной альтернативе различным видам ископаемого топлива. Глобальное годовое потребление водорода в 2018 году достигло приблизительно 115 млн т, причем практически весь этот водород был получен из ископаемых видов топлива (угля и природного газа) в месте потребления. В настоящее время на долю угольного сырья приходится около 27 % объема производимого водорода с учетом энергозатрат, необходимых для его производства, а на долю природного газа — более 70 % остального производимого водорода (Kelsall 2021). Согласно прогнозам, глобальный годовой уровень потребления водорода к 2050 году вырастет примерно до 650 млн т, что составит около 14 % от прогнозируемого общемирового потребления энергии (Kelsall, 2021).

36. Чистый водород, скорее всего, будет применяться там, где он станет единственным технически возможным решением, позволяющим добиться декарбонизации, или где он будет иметь несомненное преимущество перед другими решениями. К таким случаям относятся использование в качестве сырья в химической промышленности, использование при выплавке чугуна и стали из природного сырья, топливо для дальних перевозок и хранение в изолированных электрических системах. Кроме того, водород может стать предпочтительным решением для достижения декарбонизации в следующих случаях: использование в качестве топлива в авиации, использование в качестве топлива для дальних автоперевозок, использование в зданиях в дополнение к электроэнергии и использование для хранения/накопления во взаимосвязанных электроэнергетических системах. Из угольного сырья можно получить поток водорода чистотой около 99,8 %. Ведущим мировым производителем водорода является Китай, однако другие страны также двигаются вперед. В 2017 году Япония разработала стратегический план и провозгласила необходимость внедрить применение водорода в качестве основного вида топлива в нескольких областях. Почти сразу вслед за ней Южная Корея также представила собственную «дорожную карту» развития водородного общества, в которой особое внимание уделяется транспортному сектору.

37. Для ускорения внедрения потребуются политические меры, в том числе поддержка для направления позитивных сигналов на долгосрочную перспективу потенциальным инвесторам, стимулирование потребления чистого водорода на существующих и новых рынках, снижение рисков инвесторов и разработка бизнес-моделей, определение программы НИОКР, касающихся этой технологии, и обеспечение создания нормативно-правовой базы (Kelsall, 2021).

D. Экологические проблемы

38. С экологической точки зрения, беспокойство вызывает ограниченность водных ресурсов в более засушливых северных районах Китая, где находится большая часть запасов пригодного угля. Вне зависимости от используемой технологии конверсии необходимо уделить особое внимание ограничению количества потребляемой воды за счет оптимизации процессов и повторного использования воды везде, где это будет практически возможно. Правительство установило жесткие требования для обеспечения максимальной рециркуляции воды, и они должны быть учтены в проекте технологического процесса и плане эксплуатации, так как это имеет ключевое

значение для утверждения проекта. В силу этих причин появился целый ряд инновационных технологий. Однако в конечном итоге упомянутые сложности могут послужить препятствием для роста сектора конверсии угля.

39. Еще одна трудность связана с выбросами CO₂ в атмосферу. Хотя конечная продукция имеет высокую потребительскую ценность и является экологически чистой, при ее производстве из низкосортного угля выделяется больше CO₂, чем при сжигании этого угля. Если сектор продолжит расти, то такой уровень выбросов парниковых газов может негативно повлиять на выполнение заявленного Китаем намерения пройти пик выбросов CO₂ в стране к 2030 году. Однако, как было сказано выше, при конверсии угля концентрированный CO₂ образуется до выделения в атмосферу, что позволяет искать низкочастотные способы для его улавливания и использования для повышения нефтеотдачи пластов при добыче нефти. В Китае многие предприятия по газификации угля являются крупномасштабными источниками концентрированных потоков CO₂, но, что не менее важно, такие объекты сосредоточены в различных промышленных районах и расположены в разумной близости от нефтяных скважин. Поэтому предельные затраты на внедрение этого подхода по сравнению с затратами на улавливание CO₂ на угольных электростанциях будут невысоки. Стоимость водорода, произведенного путем газификации угля с удалением углерода, как правило, втрое ниже стоимости водорода, получаемого путем электролиза воды, и составляет около 1,9–2,4 долл. США за кг H₂, причем в Китае эта цифра еще ниже и составляет 1,6 долл. США за кг H₂. Накопление опыта на практике в ходе широкомасштабного промышленного внедрения, а также потенциальная экономия средств благодаря технологическим инновациям должны привести к дальнейшему снижению затрат к 2050 году. Что касается выбросов, то углеродоемкость этого процесса может составить менее 3 кгCO₂/кг H₂. Этот показатель может быть улучшен за счет добавления к перерабатываемому угольному топливу части биомассы или органических отходов, благодаря чему выход CO₂ на один килограмм H₂ можно довести до нуля или даже до отрицательных значений.

40. Знаменательно, что группа «Синопек», в которую входит компания «Чайна петролеум энд кемикал корпорейшн» и которая является крупнейшим в мире нефтепереработчиком по объему производства, начала строительство первого в стране объекта УИХУ мегатонного масштаба в восточно-китайской провинции Шаньдун (China Daily, July 2021), пуск которого запланирован на конец 2021 года. Этот проект предусматривает улавливание 10,68 млн т CO₂ с нефтеперерабатывающего завода «Цилу» компании «Синопек» и его закачку в течение следующих 15 лет в пласты нефтяного месторождения Шенли для повышения нефтеотдачи примерно на 2,97 млн тонн. Он станет первым в Китае демонстрационным проектом промышленного прототипа предприятия по УИХУ, и после того, как эффективность этого подхода будет подтверждена, за этим проектом последуют другие, в том числе на предприятиях по конверсии угля в химическое сырье/топливо будущего.

41. Кроме того, с помощью этого проекта «Синопек» заложит прочную основу для реализации более масштабных проектов УИХУ и тем самым будет способствовать выполнению Китаем обязательств по достижению пика выбросов углерода до 2030 года и углеродной нейтральности к 2060 году.

42. В последнее время другие страны также заявляли о намерении инвестировать в газификацию угля для производства топлива и удобрений; в их число входят Индонезия и Индия, а также Пакистан и ряд африканских стран в рамках инициативы «Один пояс, один путь» (Reid I, 2021).

VI. Другие продукты конверсии угля

43. Хотя технология газификации угля позволяет эффективно преобразовывать уголь в высококачественное химическое сырье и топливо, существуют альтернативные подходы, предполагающие производство все более широкого спектра

неэнергетической продукции с высокой потребительской ценностью, которая также конкурирует с соответствующими производными нефти и газа (Reid I, 2018). К числу таких продуктов относятся каменноугольный пек, критические элементы, активированный уголь, углеродное волокно, электродные материалы и наноматериалы, хотя и при производстве этой продукции придется решать те же коммерческие и экологические проблемы. Тем не менее поскольку производить такие продукты из угольного сырья в принципе возможно, в мире строится все больше соответствующих промышленных производств (Reid, 2021).

44. Ниже перечислены наиболее перспективные варианты.

a) Углеродное волокно получают из каменноугольной смолы, которая является побочным продуктом высокотемпературного коксования угля для производства металлургического кокса. Это наиболее перспективный экономичный способ производства волокна для применения на транспорте и в строительстве. Углеродное волокно в значительной степени заменило металлы в конструкции фюзеляжей в авиастроении благодаря экономическому эффекту от повышения прочности и уменьшения веса. Кроме того, существует возможность его использования в электромобилях: на данный момент большую проблему в этой области представляет вес аккумуляторных батарей, и необходимо найти способ компенсировать его за счет снижения веса автомобиля. За счет углеродного волокна можно добиться и других преимуществ, поскольку у него, помимо прочего, есть и такие достоинства, как химическая инертность и низкая теплопроводность, что может продлить срок службы батареи. Кроме того, это волокно может найти применение в строительстве: изделия из углеродного волокна могут быть использованы для производства легких изоляционных материалов или элементов конструкции (Reid, 2021).

b) Графен — это новый двумерный углеродный материал, обладающий особыми свойствами. Он может применяться в производстве чувствительных элементов, в медицине, в изготовлении композитных материалов, батарей, покрытий, электроники, в текстильной и автомобильной промышленности (Graphene-Info, 2019). В настоящее время продолжается работа над технологиями его производства, и среди четырех наиболее перспективных способов его получения химический метод, метод формирования из расплава солей и мгновенный нагрев джоулевым теплом, который может стать наиболее легко масштабируемой технологией производства графена для использования в товарной продукции.

c) Использование бурого угля в сельском хозяйстве в частично окисленном или сыром виде в качестве гуматного удобрения может противодействовать ухудшению состояния почвы.

d) Еще один ключевой вариант использования угля — это извлечение из него минералов, поскольку уголь представляет собой альтернативный источник редкоземельных элементов (РЗЭ), которые жизненно важны для современных коммуникаций, аэрокосмической промышленности, электротранспорта и различных технологий использования переменных источников возобновляемой энергии. Поставки таких элементов стратегически необходимы. Их можно обеспечить за счет переработки угольных отходов, при этом по итогам первоначальных испытаний чистота РЗЭ превысила целевые показатели, а за счет таких мер, как рентгеновская сортировка, может быть решена проблема более низкой концентрации РЗЭ в угле по сравнению с рудами РЗЭ. Новые технологии позволяют извлекать РЗЭ из угля нехимическим путем и тем самым сократить объем требующих утилизации отходов. Это дает возможности для извлечения РЗЭ в рамках процедур по восстановлению земель на месте погашенных горных выработок.

VII. Перспективы развития: основные выводы

A. Применение технологии газификации угля для выработки электроэнергии и комбинированной выработки тепло- и электроэнергии

45. Газификация представляет собой альтернативу более традиционным способам преобразования сырья, такого как уголь, биомасса и некоторые виды отходов, в электроэнергию и другие полезные продукты. Преимущества использования этой технологии в энергетическом секторе заключаются в том, что она предлагает потенциально более экономичный способ удаления CO₂ при более высокой эффективности цикла по сравнению с системами сжигания угля. Дальнейшее развитие технологий интеграции, конструкции турбин и вспомогательных процессов позволит достичь еще более высокой эффективности КЦКГ. Однако такие системы более сложны и требуют более высоких капитальных затрат, и на сегодняшний день число промышленных установок этого типа невелико. Лидером в развитии этой технологии является Япония, но пока неясно, сохранится ли эта ситуация с учетом недавней смены политического курса на встрече «Большой семерки» в 2021 году. Так или иначе, производство водорода путем газификации угля с УИХУ для производства электроэнергии при почти нулевых выбросах углерода представляется перспективным.

46. В конечном итоге то, насколько полно будет реализован рыночный потенциал технологии газификации для производства электроэнергии и комбинированной выработки тепло- и электроэнергии, будет зависеть от рынков размещения технологии с учетом многих технико-экономических и политических факторов, включая затраты, надежность, доступность и ремонтпригодность, экологические соображения, эффективность, гибкость в отношении сырья и продукции, инфраструктуру, соображения национальной энергетической безопасности, мнение общественности и правительства и государственную политику.

B. Топливные элементы для комбинированной выработки тепло- и электроэнергии

47. Частью решения, позволяющего достичь экологических целевых показателей по выбросам и повысить КПД выработки электроэнергии, могут стать стационарные системы топливных элементов. В этом отношении серьезную трудность представляют большие затраты и малый срок службы таких элементов. Таким образом, хотя топливные элементы на основе водорода представляют собой привлекательный вариант для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, они еще не прошли проверку в промышленных масштабах. В этой области мировым лидером со стратегической программой является Япония, но масштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ведут также Южная Корея и США.

48. До сих пор масштабы применения топливных элементов и связанных с ними технологий были крайне малы, поскольку рыночный спрос на них был недостаточным для инвестиций в передовые технологии производства. Снижение затрат по их производству благотворно скажется на всех аспектах систем топливных элементов, в том числе для производства и систем хранения водорода, а также создания водородной инфраструктуры. Решающее значение для совершенствования стационарных технологий применения топливных элементов в ближайшем будущем и до их выхода на рынок будет иметь поддержка со стороны правительств.

С. Использование технологий газификации угля для производства химической продукции и топлива будущего

49. Использование технологий газификации угля для производства газообразных и жидких видов топлива (топлива будущего) способно обеспечить удовлетворение важных стратегических потребностей, особенно в ряде развивающихся и промышленно развитых стран, где уголь является основным источником топлива и где сложно обеспечить бесперебойные поставки таких энергоносителей, как нефть и газ. Однако в силу ряда технических и экономических причин промышленное внедрение этих технологий в таких странах может быть сопряжено с проблемами. Технологическим лидером в этой области по-прежнему является Китай, где создан промышленный сектор, действующий на коммерческой основе, занимающийся преимущественно переработкой низкосортных, малоценных углей в высокоценные химические продукты, в том числе в жидкое и газообразное топливо будущего. Китай может служить образцом на всех этапах развития этого промышленного цикла, включая финансовую базу для обеспечения таких проектов по конверсии угля и связанных с ними инфраструктурных потребностей.

50. Остаются опасения по поводу выбросов CO₂ в результате некоторых химических производственных процессов, но они могут быть сняты путем включения в цикл производства реактора сдвига для получения концентрированного потока водорода и потока CO₂. Последний может быть направлен на хранение или для дальнейшего использования, что позволяет достичь практически нулевого уровня выбросов углерода.

51. В то же время важно наращивать объемы производства, а в ближайшей перспективе необходимо принять меры для преодоления барьеров и снижения затрат, с тем чтобы увеличить потребление водорода. Так, потребуются политические меры, призванные направить позитивные сигналы на долгосрочную перспективу потенциальным инвесторам, стимулировать спрос на чистый водород на существующих и новых рынках, снизить риски инвесторов и разработать бизнес-модели, определить программу исследований, касающихся этой технологии, и, наконец, обеспечить выработку нормативно-правовой базы.

Д. Получение из угля критических минералов, редкоземельных элементов и неэнергетических продуктов

52. Этот технологический подход служит дополнением к технологиям газификации угля и предполагает использование угля как ресурса для производства продукции с высокой стоимостью. Критические минералы и редкоземельные элементы стратегически необходимы, поскольку они используются для производства важнейших компонентов, например большинства современных устройств связи, притом что их традиционные источники весьма ограничены. Не менее важно и то, что получение из угля инновационных материалов с высоким содержанием углерода создает принципиально новые возможности для использования угля. Имеется значительный потенциал коммерческой эксплуатации этих технологий, причем в тех секторах рынка, которые прежде были мало связаны с углем. В настоящее время осуществляются масштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские программы, направленные на создание эффективных технологий переработки, позволяющих производить такую продукцию для этих новых секторов рынка.

VIII. Перечень использованных материалов

- China Daily (2021) Sinopec's carbon capture project on. URL: <http://global.chinadaily.com.cn/a/202107/06/WS60e3ab29a310efa1bd65fe3e.html> (July 2021)
- Collot A-G (2002) Matching gasifiers to coals, IEACCC Report CCC/65 (October 2002)
- Fernando R (2008) Coal gasification, IEACCC report CCC/140 (October 2018)
- Graphene-Info (2019) Graphene-Info's top 10 graphene applications of 2019. URL: <http://www.graphene-info.com/graphene-Infos-top-10-graphene-applications-2019> (2019)
- Henderson C (2008) Future developments in IGCC, IEACCC report CCC/143 (December 2008)
- Kelsall G (2021) Coal to hydrogen IEACCC Report (July 2021, in press)
- Minchener A (2019) Development and deployment of future fuels from coal IEACCC report for the IEA Working party on Fossil Energy (June 2019)
- Mitsubishi Power (2021) Nakoso IGCC Power plant completed. URL: <https://power.mhi.com/news/20210419.html> (дата обращения: июль 2021 года)
- Nehrir M and Wang C (2016) Chapter 6 Fuel cells. In Electric Renewable Energy Systems, Rashid M H ed., ISBN: 978-0-12-804448-3, Elsevier, 92-113 (2016)
- netl (2013a) Gasifipedia: gasification in detail, fixed (moving) bed gasifiers. URL: http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-1_fmb.html (2013)
- netl (2013b) Gasifipedia: gasification in detail, entrained flow gasifiers. URL: http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-2_entrainedflow.html (2013)
- netl (2013c) Gasifipedia: gasification in detail, fluidized bed gasifiers. URL: http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-3_fluidizedbed.html (2013)
- netl (2020) Technology for SNG production URL: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/coal-to-sng> (дата обращения: декабрь 2020 года)
- netl doe (2021) Gasification introduction. URL: <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification> (дата обращения: июнь 2021 года)
- Osaki Coolgen Corporation (2021) Overview of the Osaki CoolGen Project. URL: <https://www.osaki-coolgen.jp/en/project/overview.html> (дата обращения: июль 2021 года)
- Reid I (2018) Non-energy uses of coal, IEACCC Report CCC/291 (November 2018)
- Reid I (2021) Advances in non-energy products from coal IEACCC Report CCC/311 (June 2021)
- Sasol (2010) Unlocking the potential wealth of coal. URL: http://www.sasol.com/sasol_internet/downloads/CTL_Brochure_1125921891488.pdf Sasol, South Africa (2010)
- Seeking Alpha (2012) New vision: the potential for coal gasification and coal chemical industry development in Mongolia. URL: <http://seekingalpha.com/article/850891-a-new-vision-the-potential-for-coal-gasification-and-coalchemical-industry-development-in-mongolia> (6 September 2012)
- Woodall B (2014) The Development of China's Developmental State: Environmental Challenges and Stages of Growth. China Research Center (Retrieved June 2019)
- Zhang X (2018) Current status of stationary fuel cells for coal power generation URL: <https://www.researchgate.net/publication/326486840> (2018)